

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955 Skikda  
Faculté des Sciences  
Département : Sciences de la matière

جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة  
كلية العلوم  
قسم: علوم المواد



Thèse présentée en vue de l'obtention  
du diplôme de  
**Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle**

Option : Physique énergétique

Thème :

---

**Etude des transferts thermiques lors de la fusion d'un  
matériau à changement de phase (MCP)**

---

Présentée par :

**Nesrine Boulaktout**

Soutenue publiquement le 02/03/2022

Devant le jury composé de :

M. OMEIRI Djamel	Prof.	Université 20 Août 1955	Président
M. MEZAACHE El Hacene	Prof.	Université 20 Août 1955	Rapporteur
M. ATTAF Nadir	Prof.	Université Frères Mentouri - Constantine 1	Examineur
M. LAOUER Abdelghani	MCA	Université Mohamed Seddik Benyahya	Examineur

Ref : D012119004

*À mes parents,  
À ma famille,  
À mes enfants Yahia et Khalil,  
Je dédie ce modeste travail.*

# Remerciements

*Je remercie Allah tout puissant de m'avoir donné la force et le courage de mener à terme ce modeste travail.*

*Le présent travail a été réalisé au Laboratoire de Recherche sur la Physico-chimie des Surfaces et Interfaces, LRPCSI, Université 20 Août 1955-Skikda*

*Je remercie, en premier lieu mon directeur de thèse, monsieur El-Hacène Mezaache, professeur à l'université 20 Août 1955 Skikda, pour son soutien, sa grande disponibilité et ses nombreux conseils durant toute cette période de réalisation de ce travail.*

*Je tiens à remercier Monsieur Omeiri Djamel, professeur à l'université 20 Août 1955 Skikda qui m'a honoré de présider ma thèse.*

*Je remercie également monsieur Attaf Nadir, professeur à l'université Mentouri Constantine 1 et Monsieur Laouer Abdelghani, Maître de Conférences à l'université Mohamed Seddik Benyahya de Jijel, d'avoir accepté d'examiner ma thèse malgré leurs nombreuses occupations. Je les remercie très sincèrement.*

*Je tiens vivement à remercier Monsieur Teggat Mohamed, professeur à l'université Amar Telidji de Laghouat pour ses précieux conseils ainsi que pour ses recommandations pour le bon déroulement de ma recherche scientifique.*

*Un énorme remerciement à mes parents, mon mari, mes frères qui m'ont apporté une aide prodigieuse, m'ont encouragé et soutenu lors de toutes mes années d'études et ont cru en moi depuis toujours.*

*Enfin, je remercie toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont aidé au bon déroulement de ce travail.*

*Merci à tous et à toutes*

# **Etude des transferts thermiques lors de la fusion d'un matériau à changement de phase (MCP)**

## **RESUME**

L'immersion d'ailettes dans des systèmes de stockage d'énergie thermique à chaleur latente a été utilisée comme une approche influente pour améliorer les performances thermiques et trouver une solution à la faible conductivité thermique des matériaux à changement de phase (MCPs).

Ce travail étudie numériquement l'amélioration du transfert de chaleur et du changement de phase au moyen d'ailettes longitudinales dans une conduite annulaire horizontale.

L'objectif principal de cette étude est d'étudier l'effet de l'orientation des ailettes sur les performances de l'unité de stockage thermique. Six configurations de différents nombres d'ailettes (2, 4, et 8 ailettes) et d'orientations ( $\pi / 2$ ,  $\pi / 4$  et  $\pi / 8$ ) sont testées. Pour les simulations, un modèle mathématique 2D intégrant la méthode d'enthalpie-porosité et les techniques des volumes finis est établi et résolu par le logiciel ANSYS-Fluent.

Les prédictions numériques sont validées avec succès par comparaison avec les données expérimentales et numériques de la littérature.

Les caractéristiques de transfert de chaleur et le processus de fusion sont analysés à travers les lignes de courant, les isothermes, la température moyenne, le flux de chaleur et le coefficient de transfert de chaleur ainsi que la position du front de fusion et les fractions liquides.

Les résultats montrent que l'orientation des ailettes a un impact significatif sur le temps de charge pour deux cas (2 et 4 ailettes) alors qu'aucune réduction significative du temps de charge n'a été obtenue pour le cas de 8 ailettes. En cas d'utilisation de 2 ailettes, une orientation des ailettes de  $0^\circ$  (ailettes verticales) réduit le temps de charge jusqu'à 2,5 fois par rapport aux ailettes horizontales ( $90^\circ$ ). Ces résultats pourraient aider à concevoir des unités de stockage d'énergie thermique latente efficaces.

*Mots clés : Ailette longitudinale, Matériau à changement de phase (MCP), Fusion, Orientation, Stockage thermique.*

# Study of heat transfers during the melting of a phase change material (PCM)

## ABSTRACT

Immersion of fins in latent heat thermal energy storage (LHTES) systems has been used as an influential approach to remedy the poor thermal conductivity of phase-change materials (PCMs).

This work numerically investigates heat transfer and phase-change improvement by means of longitudinal fins in a double pipe thermal energy storage unit. The main aim of this study is to investigate the effect of fin orientation on the performance of the thermal storage unit. Six configurations of different fin numbers (2, 4, and 8 fins) and orientations ( $\pi/2$ ,  $\pi/4$ , and  $\pi/8$ ) are tested. For simulations, a two-dimensional mathematical model incorporating the enthalpy-porosity method and finite volume techniques are established and solved by ANSYS-FLUENT software.

The numerical predictions are successfully validated by comparison with experimental and numerical data from the literature.

Heat transfer characteristics and melting process are analyzed through streamlines, isotherms, mean temperature, heat flux (HF), and heat transfer coefficient (HTC) as well as transient melting front position and liquid fractions.

Results show that orientation of fins has a significant impact on the charging time for two cases (2 and 4 fins) whereas no significant reduction in charging time was obtained for the case of 8 fins. In case of utilizing 2 fins, a fin orientation of  $0^\circ$  (vertical fins) shortens the charging time by up to 2.5 folds compared with the horizontal fins ( $90^\circ$ ). These results could help designing efficient latent thermal energy storage units.

**Keywords:** *Longitudinal fin, Phase-change material (MCP), Melting, Orientation, Thermal storage.*

## دراسة انتقال الحرارة أثناء ذوبان مادة متغيرة الطور

### ملخص

تم استخدام الزعانف في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة كنهج مؤثر لمعالجة التوصيل الحراري الضعيف لمواد متغيرة الطور.

يعتمد هذا البحث على دراسة عددية لتحسين النقل الحراري وتغيير الحالة عن طريق الاستعانة بزعانف طويلة في وحدة تخزين الطاقة الحرارية ذات الأنبوب المزدوج. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو معرفة تأثير اتجاه الزعنف على أداء وحدة التخزين الحراري. تم اختبار ست نماذج لأعداد (2، 4 و 8 زعانف) واتجاهات ( $\pi/2$ ،  $\pi/4$  و  $\pi$ ) مختلفة من الزعانف. بالنسبة لعمليات المحاكاة، تم استخدام البرنامج ANSYS-FLUENT لإنشاء و حل نموذج رياضي ثنائي البعد يستند على طريقة الطاقة الكامنة المسامية وتقنيات الحجم المنتهية.

تم التحقق بنجاح من صحة نتائج هذا النموذج العددي من خلال المقارنة مع البيانات التجريبية والعديد لأعمال سابقة.

يتم تحليل خصائص نقل الحرارة وعملية الانصهار من خلال خطوط الانسياب، خطوط التساوي الحراري، متوسط درجة الحرارة، تدفق الحرارة، ومعامل نقل الحرارة بالإضافة إلى تغيير موضع الانصهار مع الزمن ونسبة الجزء السائل.

تظهر النتائج أن اتجاه الزعانف له تأثير كبير على الوقت اللازم للقيام بالشحن التام للحالتين (2 و 4 زعانف) بينما لم يتم الحصول على انخفاض كبير لهذا الوقت بالنسبة لحالة 8 زعانف. في حالة استخدام زعنفتين، فإن توجيه الزعانف بمقدار 0 درجة (الزعانف العمودية) يقلل من وقت الشحن ب 2.5 أضعاف مقارنة بالزعانف الأفقية (90 درجة). يمكن أن تساعد هذه النتائج في تصميم وحدات أكثر فعالية في تخزين الطاقة الكامنة الحرارية.

الكلمات المفتاحية: زعانف طويلة، مادة متغيرة الطور، ذوبان، اتجاه، تخزين حراري.

## Table de matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumés	iii-v
Table de matières	vi-vii
Nomenclature	viii-ix
Liste des figures	x-xi
Liste des tableaux	xii
Introduction générale	1
<b>Chapitre 1 : Revue bibliographique sur le stockage thermique par matériaux à changement de phase</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction	5
1.2 Le stockage thermique	
1.3 Types du stockage d'énergie thermique	
1.3.1 Stockage par chaleur sensible (SCS)	
1.3.2 Stockage thermochimique	6
1.3.3 Stockage par chaleur latente (SCL)	
1.4 Les matériaux à changements de phase (MCP)	7
1.4.1 Propriétés recommandées des MCPs	
1.4.2 Classification des MCPs	8
1.4.2.1 MCP inorganiques	9
1.4.2.2 MCP organiques	10
1.4.2.3 MCP eutectiques	12
1.5 Applications des MCPs dans les systèmes de stockage d'énergie thermique	
1.5.1 Applications dans le bâtiment	
1.5.2 Applications dans les véhicules	17
1.5.3 Applications aux refroidissements des composants électroniques	
1.6 Différents modèles géométriques de l'unité de stockage thermique	19
1.6.1 Unités rectangulaires	
1.6.2 Unités sphériques	21
1.6.3 Unités annulaires	22

1.4.6 Unités innovantes	23
1.2 Conclusion	24
<b>Chapitre 2 : Formulation mathématique et validations numériques</b>	<b>25</b>
2.1 Introduction	25
2.2 Modélisation mathématique	
2.2.1 Modèle physique	
2.2.2. Propriétés thermophysiques du MCP	27
2.3. Formulation mathématique	
2.4 Procédure numérique et validation	29
2.5 Conclusion	39
<b>Chapitre 3 : Etude de la fusion dans une conduite annulaire horizontale équipée</b>	<b>40</b>
• <b>deux ailettes</b>	
3.1 Introduction	40
3.2 Description du système	
3.3 Résultats et discussions	41
3.3.1 Cas d'un échangeur sans ailettes	
3.3.2 Cas d'un échangeur avec deux ailettes horizontales	46
3.3.3 Cas d'un échangeur avec deux ailettes verticales	52
3.4 L'effet de l'orientation des ailettes	56
3.5 Conclusion	61
<b>Chapitre 4 : Etude de l'influence de l'orientation des ailettes sur le processus de</b>	<b>62</b>
<b>fusion dans une conduite annulaire horizontale d'un système de stockage</b>	
<b>thermique</b>	
4.1 Introduction	62
4.2 Description du système	
4.3 Résultats et discussion	64
4.3.1 Cas d'un échangeur de chaleur avec quatre ailettes	
4.3.2 Cas d'un échangeur de chaleur avec huit ailettes	69
4.4 Effet du nombre et de l'orientation des ailettes	74
Conclusion générale	79
<b>Références</b>	<b>81</b>

## Nomenclature

### *Caractères latins*

$A$	fonction de porosité	[-]
$C$	constante de zone pâteuse	[-]
$C_p$	chaleur massique	J/(kg.K)
$g$	accélération de la pesanteur	m/s <sup>2</sup>
$H$	enthalpie	kJ
$h$	coefficient de transfert thermique	W/m <sup>2</sup> K
$k$	conductivité thermique	W/m K
$L$	chaleur latente	kJ/kg
$p$	pression	Pa
$S$	terme source	Pa/m
$t$	temps	s
$T$	température	K
$u$	vitesse	m/s

### *Caractères grecs*

$\Phi$	fraction liquide	kg/(m s)
$\varphi$	densité de flux de chaleur	W/m <sup>2</sup>
$\beta$	coefficient d'expansion thermique	1/K
$\theta$	angle d'inclinaison	°
$\mu$	viscosité dynamique	Pa.s
$\rho$	masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
$\Delta T$	différence de température	K

### *Nombres adimensionnels*

$Fo$	nombre de fourrier
$Ha$	nombre de Hartmann
$Ra$	nombre de Rayleigh

### *Abréviation*

A	ailette
AR	aspect ratio
FC	fluide caloporteur

HF	densité de flux de chaleur
HTC	coefficient de transfert de chaleur
MCP	matériaux à changement de phase
MF	champ magnétique
MPPCM	matériau à changement de phase macro-emballé
P	tube intérieur
SCS	stockage par chaleur sensible
SETCL	stockage d'énergie thermique à chaleur latente
SCL	stockage par chaleur latente
UDF	fonctions définies par l'utilisateur

### ***Indices***

<i>av</i>	moyenne
<i>c</i>	chaud
<i>f</i>	fusion
<i>ini</i>	initiale
<i>liq</i>	liquide
<i>ref</i>	référence
<i>sol</i>	solide
<i>w</i>	paroi

## Liste des figures

Figure 1.1	Classification des MCPs	8
Figure 1.2	Schéma du système de chauffage solaire [49]	16
Figure 2.1	Représentation schématique de l'échangeur de chaleur à tube annulaire	26
Figure 2.2	Représentation schématique des cas étudiés	26
Figure 2.3	Schéma du processus de solution CFD	30
Figure 2.4	Optimisation du pas de temps	30
Figure 2.5	Présentation du maillage pour le cas A	31
Figure 2.6	Présentation du maillage pour le cas A1 (à gauche) et A2 (à droite)	31
Figure 2.7	Présentation du maillage pour le cas B1 (à gauche) et B2 (à droite)	32
Figure 2.8	Présentation du maillage pour le cas C1 (à gauche) et C2 (à droite)	32
Figure 2.9	Dépendance du maillage aux prédictions numériques pour le cas A	33
Figure 2.10	Dépendance du maillage aux prédictions numériques pour le cas A1	33
Figure 2.11	Dépendance du maillage aux prédictions numériques pour le cas A2	34
Figure 2.12	Dépendance du maillage aux prédictions numériques pour le cas B1	34
Figure 2.13	Dépendance du maillage aux prédictions numériques pour le cas B2	35
Figure 2.14	Dépendance du maillage aux prédictions numériques pour le cas C1	35
Figure 2.15	Dépendance du maillage aux prédictions numériques pour le cas C2	36
Figure 2.16	Comparaison des prédictions numériques avec des données expérimentales	37
Figure 2.17	Comparaison des prédictions numériques avec les résultats numériques	37
Figure 2.18	Comparaison des prédictions numériques du front de fusion	38
Figure 3.1	Représentation schématique des cas étudiés	40
Figure 3.2	Front de fusion (a), lignes de courants (b), et isothermes (c) pour un échangeur sans ailettes	42
Figure 3.3	Mouvement ascendant du MCP fondu pour un échangeur sans ailettes (5min)	43
Figure 3.4	Fraction liquide en fonction du temps	45
Figure 3.5	Température moyenne en fonction du temps	45
Figure 3.6	Front de fusion (a), lignes de courants (b), et isothermes (c) pour le cas d'un échangeur avec deux ailettes horizontales	48
Figure 3.7	Mouvement ascendant du MCP fondu pour un échangeur avec deux ailettes horizontales (5min)	49
Figure 3.8	Densité de flux de chaleur en fonction du temps pour le cas d'un échangeur avec deux ailettes horizontales	51
Figure 3.9	Coefficient de transfert thermique en fonction du temps pour le cas d'un échangeur avec deux ailettes horizontales	51
Figure 3.10	Front de fusion (a), lignes de courants (b) et isothermes (c) pour le cas d'un échangeur avec deux ailettes verticales	53
Figure 3.11	Mouvement ascendant du MCP fondu pour un échangeur avec deux ailettes verticales (5min)	54

Figure 3.12	Densité de flux de chaleur en fonction du temps pour le cas d'un échangeur avec deux ailettes verticales	55
Figure 3.13	Coefficient de transfert thermique en fonction du temps pour le cas d'un échangeur avec deux ailettes verticales	55
Figure 3.14	Comparaison du front de fusion entre les configurations d'ailettes horizontales et verticales	57
Figure 3.15	Comparaison du temps total de fusion en fonction du temps entre les configurations d'ailettes horizontales et verticales	58
Figure 3.16	Comparaison de la fraction liquide en fonction du temps entre les configurations d'ailettes horizontales et verticales	58
Figure 3.17	Comparaison de la température moyenne en fonction du temps entre les configurations d'ailettes horizontales et verticales	59
Figure 3.18	Comparaison de l'énergie stockée en fonction du temps entre les configurations d'ailettes horizontales et verticales	59
Figure 3.19	Comparaison des densités de flux de chaleur entre les configurations d'ailettes horizontales et verticales	60
Figure 3.20	Comparaison du coefficient de transfert de chaleur entre les configurations d'ailettes horizontales et verticales	60
Figure 4.1	Représentation schématique des cas étudiés	63
Figure 4.2	Front de fusion (a), lignes de courants (b), et isothermes (c) pour les cas des échangeurs à 4 ailettes	66
Figure 4.3	Densité de flux de chaleur et coefficient de transfert thermique en fonction du temps pour le cas d'un échangeur à 4 ailettes (cas B1)	67
Figure 4.4	Densité de flux de chaleur et coefficient de transfert thermique en fonction du temps pour le cas de 4 ailettes (cas B2)	68
Figure 4.5	Front de fusion (a), lignes de courants (b), et isothermes (c) pour les cas des échangeurs à 8 ailettes	70
Figure 4.6	Densité de flux de chaleur et coefficient de transfert thermique en fonction du temps pour le cas de 8 ailettes (cas C1)	71
Figure 4.7	Densité de flux de chaleur et coefficient de transfert thermique en fonction du temps pour le cas de 8 ailettes (cas C2)	72
Figure 4.8	Effets de l'orientation et du nombre d'ailettes (N=2,4, 8) sur la fraction liquide et la température moyenne	76
Figure 4.9	Effets de l'orientation et du nombre d'ailettes (N=2, 4, 8) sur le temps de fusion et le stockage d'énergie	77
Figure 4.10	Front de fusion pour différentes orientations et nombre d'ailettes	78

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b>	Température de fusion et chaleur latente de fusion de la paraffine	11
<b>Tableau 2.1</b>	Propriétés thermophysiques du n-icosane [92]	27
<b>Tableau 2.2</b>	Nombres d'éléments utilisés pour chaque cas	36

## INTRODUCTION GENERALE

Les systèmes permettant de stocker l'énergie thermique contribuent pleinement à l'économie d'énergie et au développement durable. La densité énergétique et la durée de charge/décharge de l'énergie thermique stockée sont les principaux problèmes à résoudre pour une utilisation efficace des sources d'énergie intermittentes telles que l'énergie solaire thermique. Par conséquent, l'étude du stockage d'énergie thermique à chaleur latente (SETCL) a pris de l'engouement parmi les chercheurs, étant donné que l'ampleur de la densité d'énergie thermique est élevée, ce qui permet d'éliminer le déséquilibre entre l'offre et la demande d'énergie. SETCL incorpore des matériaux à changement de phase (MCPs) qui peuvent fournir une densité de stockage d'énergie thermique élevée à une température de fonctionnement presque constante. Les MCPs ont un grand potentiel dans diverses applications thermiques telles que la construction [1], la génération d'énergie thermique [2], la récupération de chaleur [3], la réfrigération [4]... etc. Cependant, la plupart des MCPs ont une faible conductivité thermique, ce qui limite leur application, car les processus de charge et de décharge doivent être suffisamment rapides. De ce fait, diverses méthodes d'amélioration ont été explorées pour rendre la conductivité thermique des MCPs plus élevée et améliorer les processus de changement de phase dans les systèmes SETCL. Parmi ces méthodes l'utilisation de diverses géométries et configurations de SETCL pour agrandir la surface d'échange thermique entre le MCP et le fluide caloporteur. À cet égard, Seddegh et al [5] ont étudié le processus de charge et de décharge dans des systèmes coniques et cylindriques. Ils ont montré que le processus de fusion en système conique présente des performances thermiques meilleures. Par ailleurs, concernant le processus de solidification, les auteurs n'ont signalé aucune différence significative entre les deux conceptions de système. Irbai et Najjar [6] ont utilisé une nouvelle géométrie pour augmenter la surface entre le MCP et le FC dans un système SETCL. La nouvelle géométrie comprenait quatre tubes à ailettes visant à améliorer les performances du système de stockage thermique circulaire triplex conventionnel. Une amélioration significative des performances a été constatée. Le temps de fusion complet a été réduit de trois fois.

Une méthode plus efficace a fait l'objet de plusieurs études pour l'amélioration des performances des systèmes SETCL. L'utilisation d'un milieu poreux fortement conducteur en MCP est une méthode prometteuse qui a été appliquée avec succès. Mehryan et al [7] ont examiné la fusion du MCP dans une cavité inclinée avec un milieu poreux. Les résultats ont démontré que les vitesses de fusion et de transfert de chaleur sont proportionnelles à

l'épaisseur de la couche poreuse. Xu et al [8] ont étudié la fusion du MCP dans des milieux poreux infusés dans un tube concentrique pour le SETCL. Les résultats ont montré que les attachements d'insert poreux devraient être pris en considération dans la partie inférieure de l'enceinte afin d'avoir une amélioration considérable. Sundarram et Li [9] ont exploré l'influence du matériau poreux sur les caractéristiques thermiques du MCP imprégné de mousse d'aluminium. Bien qu'une amélioration du transfert de chaleur a été constaté, la capacité de stockage thermique du composite a été réduite. Par ailleurs, l'insertion d'un matériau poreux dans les systèmes à base de MCP peut augmenter le transfert de chaleur global, néanmoins la capacité de stockage de chaleur est considérablement réduite car une grande quantité de MCP est remplacée par le support poreux. De plus, la structure poreuse restreint la convection libre qui est le mode de transfert de chaleur dominant pendant le processus de fusion du MCP.

L'insertion d'ailettes dans les systèmes de stockage par MCP est une méthode d'amélioration simple, efficace et peu coûteuse. En outre, la convection naturelle de la masse fondue du MCP n'est pas entravée par l'insertion d'ailettes. De plus, Mahdi et Nsofor [10] ont montré que l'utilisation d'ailettes est plus efficace que l'utilisation de nanoparticules pour améliorer le transfert de chaleur du stockage de chaleur à base de MCP.

Différentes formes d'ailettes ont été étudiées, telles que annulaire [11], spirale [12], en forme de Y [13], en forme de V [14], triangulaire [15], en forme d'arbre [16] et d'autres formes innovantes [17]. Parmi les ailettes qui font l'objet d'un certain nombre d'études sont les ailettes longitudinales car ils sont simples avec un effet remarquable sur la performance des systèmes de SETCL. Nobrega et al [18] ont présenté des corrélations empiriques pour le processus de solidification en présence d'ailettes longitudinales en termes de largeur et de nombre d'ailettes, de débit massique du fluide caloporteur et de sa température. Rathod et Banerjee [19] ont étudié un système SETCL cylindrique vertical avec trois ailettes longitudinales. Les résultats expérimentaux ont montré une diminution du temps de décharge de 43,6%. Huang et al [20] ont étudié l'effet des ailettes longitudinales sur les performances d'une unité de stockage de glace à la fois expérimentalement et numériquement. L'optimisation des paramètres géométriques et du nombre d'ailettes a été effectuée.

L'étude a montré que l'utilisation de 8 ailettes de 3 mm d'épaisseur offrait les meilleures performances thermiques. Nobrega et al [21] ont exploré l'impact des ailettes longitudinales sur le processus de solidification de l'eau en tant que MCP. Les résultats ont montré que l'augmentation du nombre et de la largeur des ailettes conduit à un temps de décharge réduit.

Les auteurs ont également indiqué qu'il existe un nombre et une largeur d'ailettes optimaux au-delà desquels aucun effet d'amélioration ne peut être obtenu.

Sheikholeslami et al [22] ont étudié le processus de décharge des systèmes SETCL utilisant des cylindres horizontaux. L'impact d'ailettes longitudinales innovantes a été étudié numériquement. Les paramètres géométriques, y compris la longueur des ailettes et le facteur de forme, ont été examinés. Dans un autre travail, Sheikholeslami [23] a étudié numériquement le processus de solidification dans une unité SETCL de cylindres horizontaux. Les résultats ont préconisé que la longueur des ailettes a un rôle important sur le processus de solidification et le temps de décharge.

La disposition des ailettes longitudinales a également un impact sur les performances du SETCL. Des configurations comprenant des tubes à ailettes internes et externes ont été étudiées dans la littérature. Patel et Rathod [24] ont exploré numériquement les impacts de la disposition des ailettes sur le comportement thermique du MCP dans un échangeur de chaleur latente à tube triplex horizontal. Les processus de fusion et de solidification du MCP ont été analysés. Tous les arrangements d'ailettes étudiés ont montré de meilleures performances par rapport à l'échangeur de chaleur latente sans ailettes. En outre, le temps de fusion a été réduit de 60% avec des ailettes internes et internes-externes combinées tandis que le temps de solidification a été réduit jusqu'à 58% avec une combinaison d'ailettes internes-externes. Abdulateef et al [25] ont réalisé une étude numérique et expérimentale sur le processus de fusion dans un échangeur de chaleur à tube triplex. Différentes configurations d'ailettes ont été étudiées. Les auteurs ont signalé une réduction du temps de fusion de 17% pour les ailettes externes tandis que les ailettes internes et internes-externes ont montré une diminution du temps de fusion de 12% et 11%, respectivement.

L'examen de la littérature ci-dessus a montré que les paramètres géométriques des ailettes ainsi que les dispositions des ailettes internes et externes sont les éléments les plus étudiés. Cependant, l'effet de l'orientation des ailettes a reçu moins d'attention. La position angulaire des ailettes peut entraver la convection naturelle de la masse fondue, particulièrement pendant le processus de fusion. Par conséquent, l'effet de l'orientation des ailettes longitudinales a fait l'objet d'une étude récente menée par Khan et Khan [26]. Les auteurs ont étudié numériquement et expérimentalement cinq orientations (90, 75, 60, 45 et 30 degrés) de 3 ailettes immergées dans le MCP. Les études ont conclu que l'orientation 30 degrés correspond à l'orientation optimale des ailettes. Néanmoins des études approfondies sont nécessaires pour différents nombres d'ailettes afin d'élucider les impacts de l'orientation des ailettes sur les performances du SETCL.

L'objectif principal de la présente étude est de révéler l'influence de l'orientation des ailettes ( $\pi/2$ ,  $\pi/4$  et  $\pi/8$ ) pour différents nombres d'ailettes (2, 4 et 8 ailettes) sur le processus de charge et les caractéristiques de transfert de chaleur du MCP (n-eicosane) dans une unité SETCL à double tube. Le front de fusion transitoire et les fractions liquides sont examinés ainsi que les lignes de courant, les isothermes, la densité de flux de chaleur (HF) et le coefficient de transfert de chaleur (HTC) pour les paramètres mentionnés ci-dessus.

La présente étude comporte quatre chapitres. Le premier chapitre focalise sur les différentes techniques de stockage thermique, un aperçu sur les familles de matériaux à changement de phase avec leurs avantages et inconvénient. Il est suivi aussi d'un état de l'art sur les applications des systèmes de stockage thermique à chaleur latente dans les différents domaines. Le deuxième chapitre est dédié à la formulation mathématique et le traitement numérique du problème étudié. A la fin de ce chapitre, deux validations avec deux travaux numérique et expérimental ont été présentées.

Le troisième chapitre est consacré à une simulation numérique de la fusion d'un MCP dans une configuration de base (fusion d'un MCP dans un échangeur simple sans ailettes) et une discussion sur l'amélioration thermique de la fusion par l'intégration d'ailettes dans deux modèles différents. L'effet de l'orientation des ailettes sur le processus de fusion fait l'objet de ce chapitre. Enfin, un quatrième chapitre est dédié à l'effet du nombre d'ailettes et de leur orientation sur les performances du processus de fusion, selon le nombre et l'orientation des ailettes ajoutées. Dans ce chapitre quatre situations physiques sont considérées.

# Chapitre 1

## **Revue bibliographique sur le stockage thermique par matériaux à changement de phase**

## **Chapitre 1**

### **Revue bibliographique sur le stockage thermique par matériaux à changement de phase**

#### **1.1.Introduction**

Les systèmes de stockage d'énergie thermique peuvent être appliqués pour réduire les demandes de pointe de chauffage et de climatisation, ainsi pour améliorer l'efficacité thermique des installations où il y a une variation dans la disponibilité et / ou la demande, sur des échelles de temps plus ou moins longues. Il existe plusieurs types de stockage d'énergie thermique : le stockage sensible, le stockage latent, le stockage thermo-chimique. Le stockage d'énergie thermique par chaleur latente a fait l'objet d'une attention particulière du point de vue environnemental et efficacité énergétique. Dans ce chapitre, nous allons exposer les différents types de stockage d'énergie thermique, en insistant particulièrement sur le stockage d'énergie thermique par chaleur latente.

#### **1.2. Le stockage thermique**

Il consiste à stocker l'énergie thermique en chauffant ou en refroidissant un milieu de stockage afin que l'énergie stockée puisse d'être utilisée ultérieurement pour les applications de chauffage et de refroidissement ou pour la production d'électricité.

L'utilisation du stockage d'énergie thermique pour des applications thermiques telles que le chauffage de l'eau [27], le refroidissement [28], la climatisation [29], etc. a récemment reçu beaucoup d'attention.

Différentes techniques de stockage ont été développées au cours des cinq dernières décennies. L'énergie peut être stockée de trois façons [30] :

#### **1.3.Types du stockage d'énergie thermique**

##### **1.3.1. Stockage par chaleur sensible (SCS)**

Il représente la méthode la plus simple basée sur le stockage de l'énergie thermique en changeant la température par le chauffage ou par le refroidissement d'un milieu de stockage

liquide ou solide (eau, sable, sels fondus ou roches...). Dans ce cas, le matériau cède ou stocke de l'énergie dans une gamme de températures [31] sans changement de phase. La quantité d'énergie sensible stockée par un matériau est proportionnelle à la différence entre sa température d'équilibre initiale et finale, sa masse ainsi que sa capacité thermique spécifique.

En pratique, il est souhaitable que le milieu de stockage ait une capacité thermique spécifique élevée, stabilité à long terme sous le cycle thermique, et surtout un matériau à faible coût. Un autre paramètre est la vitesse à laquelle la chaleur peut être libérée et extraite. Cette caractéristique est une fonction de la diffusion thermique.

Les matériaux liquides couramment utilisés dans le système de stockage de chaleur sensible sont en particulier l'eau, fluides à base d'huile, sels fondus, etc. Concernant le milieu solide, on distingue les roches, les métaux et autres.

Bien que le stockage de l'énergie par chaleur sensible est facile et simple, plusieurs inconvénients existent, tels la perte calorifique pendant le stockage, l'encombrement et la capacité limitée de stockage.

### **1.3.2. Stockage thermochimique**

Consiste à l'utilisation de l'énergie endothermique des réactions chimiques réversibles. La chaleur de réaction stockée est souvent associée à la dissociation des réactifs chimiques en deux composants. Tout ou une partie de cette chaleur peut être récupérée plus tard lorsque la réaction de synthèse a eu lieu. Il est nécessaire que la réaction doive être totalement réversible afin que le procédé ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles.

### **1.3.3. Stockage par chaleur latente (SCL)**

Le transfert de chaleur qui se produit lorsqu'une substance passe d'une phase à une autre est appelé transfert par chaleur latente. Le stockage de l'énergie par chaleur latente implique de chauffer/refroidir un matériau jusqu'il atteint sa température de changement de phase (température de fusion/solidification pour la transition solide/liquide et température de vaporisation/liquéfaction pour la transition liquide/gaz). Le matériau absorbe/restitue de la chaleur pour changer son état, cette chaleur est connue par le nom de chaleur latente de fusion/solidification ou de vaporisation/liquéfaction selon le cas. Ce type de stockage peut être efficace pour des différences de températures très faibles.

Les matériaux à changement de phase peuvent subir des transformations en phase solide-solide, liquide-gaz ou solide-liquide. Relativement peu de (MCPs) solide-solide ont été identifiés

ayant des températures de fusion et de transition adaptées aux applications de stockage thermique. Les MCPs liquide-gaz ont généralement des chaleurs de transformations élevées, cependant, en raison de leur grand changement de volume pendant la transition, ils ne sont pas généralement considérés pour des applications pratiques. Les MCPs solide-liquide sont utiles car ils stockent une quantité d'énergie relativement importante sur une plage de température étroite et sans changement important de volume.

#### **1.4. Les matériaux à changements de phase solide-liquide (MCPs)**

Les matériaux à changements de phase sont des composés qui stockent et libèrent de la chaleur latente lors d'une transformation de phase (solide-liquide) à une température quasiment constante. Comme pour la transformation de la glace en eau qui se produit lorsque la température dépasse 0 °C, les matériaux à changements de phase changent d'état (solide-liquide) en fonction de leur température de fusion. Chaque MCP se caractérise par sa température de changement de phase.

##### **1.4.1. Propriétés caractéristiques des MCPs [30-33]**

Le MCP utilisé dans un système de stockage thermique doit posséder des propriétés thermophysiques, cinétiques, chimiques et économiques suivantes :

##### **Propriétés thermophysiques :**

- Un point de fusion/solidification dans la plage de température de fonctionnement souhaitée.
- Une chaleur latente de fusion élevée pour qu'il puisse stocker une grande quantité d'énergie dans une petite quantité de matériau.
- Une densité élevée, de sorte que moins de volume est occupé par le matériau.
- Une chaleur spécifique élevée afin de réaliser un stockage significatif supplémentaire par chaleur sensible.
- Une conductivité thermique élevée
- Un faible changement de volume lors la transformation de phase.

##### **Propriétés cinétiques :**

- La surfusion doit être minimale, en introduisant un agent de nucléation ou un déclencheur à froid dans le matériau de stockage.

**Propriétés chimiques :**

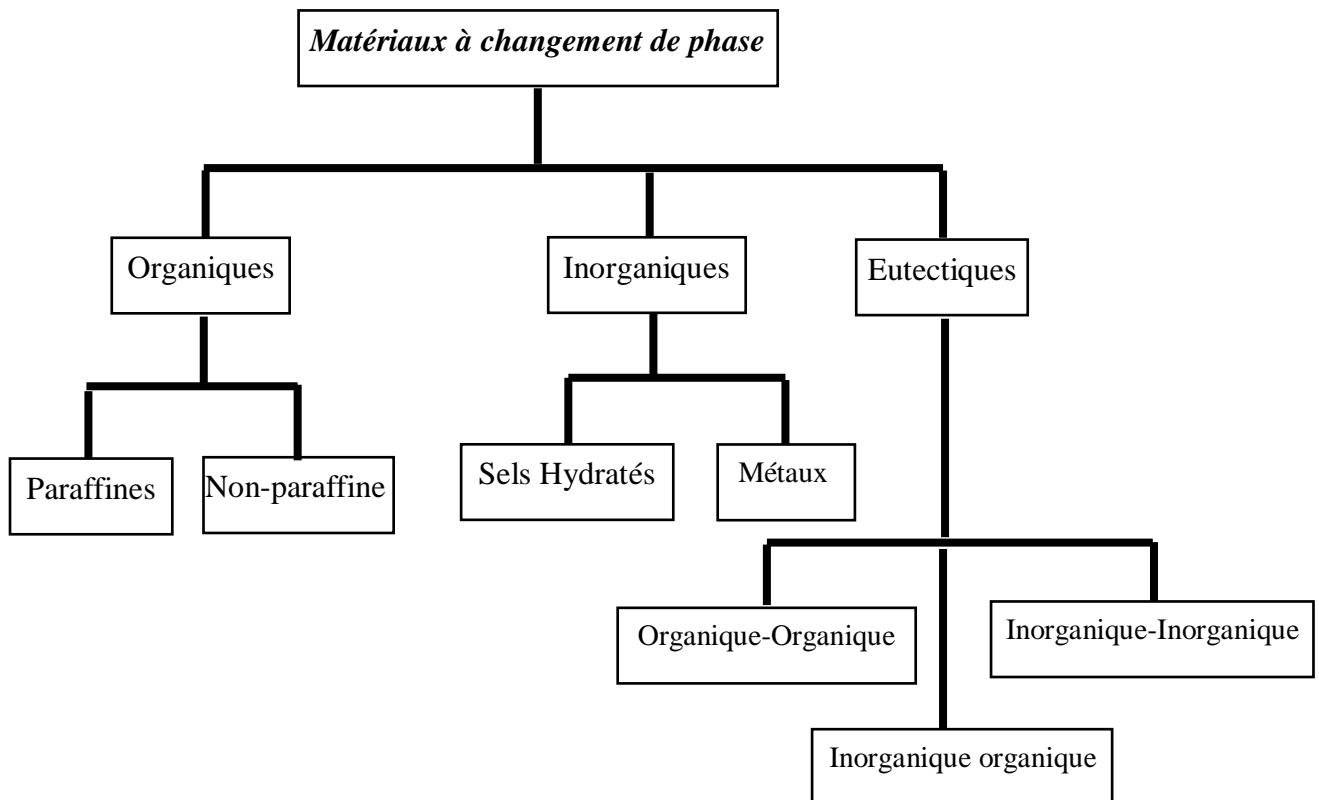
- Stabilité chimique.
- Non toxique, non inflammable et non explosif pour la sécurité.
- Cycles de fusion/solidification complètement réversibles sans une dégradation après un grand nombre de cycles solidification / fusion.

De plus, le matériau à changement de phase doit avoir des avantages économiques c'est à dire qu'il doit être disponible en grandes quantités et à faible coût.

**1.4.2. Classification des MCPs**

Les MCPs sont classés en trois grandes familles selon leur nature chimique (fig.1.2) :

1. organiques comme les paraffines, corps non-paraffiniques, polyalcools.
2. inorganiques comme les hydrates salins, sels, métaux, alliages.
3. MCPs eutectiques.



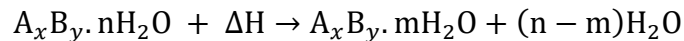
**Figure 1.1:** Classification des MCPs

### **1.4.2.1. MCP inorganiques**

La famille des MCP inorganiques comprend deux groupes: sels et hydrates de sels, et métaux et leurs alliages. Ces matériaux sont principalement utilisés dans les applications solaires à haute température et l'un des défis le plus signalé est leur entretien.

#### **Les sels et les sels hydratés**

Les hydrates de sel peuvent être considérés comme des alliages de sels inorganiques et d'eau formant un solide cristallin typique de formule générale  $A_xB_y \cdot nH_2O$ . Lors du chauffage, le sel hydraté perd son eau de cristallisation en absorbant une certaine quantité de chaleur, appelée enthalpie de déshydratation. En se refroidissant ou en étant exposé à l'atmosphère, les molécules d'eau de l'environnement sont facilement capturées par les cristaux de sel et libèrent l'énergie thermique correspondante à l'enthalpie d'hydratation. Bien que ce processus ressemble à la fusion ou à la solidification, un sel hydraté fond généralement en un hydrate de sel avec moins de moles d'eau :



Les propriétés les plus attrayantes des hydrates de sel sont [34-35]:

- Chaleur latente de fusion élevée.
- Conductivité thermique élevée.
- Peu corrosifs.
- Compatible avec les plastiques.

Les sels sont des composés ioniques neutres formés à partir de cations et d'anions. Les sels et les hydrates de sel ont des caractéristiques similaires. Ils peuvent être trouvés dans une large gamme de températures de fusion (de 10 à 900 ° C). Ces substances inorganiques sont largement utilisées dans les applications d'énergie solaire où les températures de fusion sont extrêmement élevées, comme dans les centrales solaires à concentration [36].

#### **Les métaux**

Cette catégorie comprend les métaux à faible point de fusion et leurs alliages. Par rapport à d'autres types de matériaux de changement de phase, les MCP métalliques ont une conductivité thermique plus élevée ainsi qu'une stabilité physique et chimique à des températures élevées.

Les métaux les plus prometteurs dans les applications à basse température sont le césium, le gallium, l'indium, l'étain et le bismuth tandis que les métaux utilisés dans les applications à haute température incluent le zinc, le magnésium, l'aluminium et leurs alliages [36].

#### **1.4.2.2.MCP organiques**

Les produits organiques peuvent inclure une large gamme de MCP tels que ceux de la famille des alcanes (paraffine) ( $C_nH_{2n+2}$ ) et de la famille des acides gras ( $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$ ). Ces matériaux comprennent une fusion congruente, ce qui signifie qu'ils fondent et gèlent à plusieurs reprises sans ségrégation de phase et dégradation conséquente de leur chaleur latente de fusion. Ils sont généralement non corrosifs.

#### **Les paraffines**

Les paraffines sont des alcanes à chaîne droite. C'est-à-dire que leur formule générale est  $C_nH_{2n+2}$ . Une grande quantité de chaleur se dégage par la cristallisation de ces chaînes de carbones. Plus la chaîne carbonée est grande plus la température de fusion et l'enthalpie de changement de phase sont élevées comme le montre le tableau 1.1 [37]. La plage de fusion des matériaux de la famille des paraffines a tendance à être entre 35 °C et environ 70 °C. Pour cette raison, les MCPs organiques, en particulier la paraffine, sont les MCPs les plus étudiés pour la gestion thermique en électronique.

Les avantages des paraffines [38-40] :

- Faible pression de vapeur saturante, ce qui réduit les risques de surfusion.
- Non-corrosives.
- Inodores.
- Ne présentent aucune ségrégation de phase lors des transitions de phase répétitives.
- Durables.
- Stables chimiquement et thermiquement.
- Compatibles avec tous les conteneurs en métal et s'incorporent facilement dans les systèmes de stockage de l'énergie thermique.
- Disponibles et peu coûteuses.
- Non toxiques
- Disponibles dans une large plage de températures (5-80 °C).

Les inconvénients des paraffines [41] :

- Inflammables.
- Faible conductivité thermique, ce qui diminue le taux de stockage thermique.
- Problème de compatibilité avec les conteneurs en plastiques.

<i>Nom du MCP</i>	<i>Nbre d'atomes de carbone</i>	<i>Point de fusion (°C)</i>	<i>Chaleur latente de fusion (kJ/kg)</i>
n-Dodecane	12	-12	/
n-Tridecane	13	-6	/
n-Tetradecane	14	4.5-5.6	231
n-Pentadecane	15	10	207
n-Hexadecane	16	18.2	238
n-Heptadecane	17	22	215
n-Octadecane	18	28.2	245
n-Nonadecane	19	31.9	222
n-Eicosane	20	37	247
n-Heneicosane	21	41	215
n-Docosane	22	44	249
n-Tricosane	23	47	234
n-Tetracosane	24	51	257
n-Pentacosane	25	54	236
n-Hexacosane	26	56	255
n-Heptacosane	27	59	240
n-Octacosane	28	61	253
n-Nonacosane	29	64	240
n-Triacontane	30	65	252
n-Hentriacontane	31	/	/
n-Dotriacontane	32	70	/
n-Tritriacontane	33	71	189

**Tableau 1.1:** Température de fusion et chaleur latente de fusion de la paraffine.

### **Les composés organiques non-paraffiniques**

Ils sont les nombreux matériaux à changement de phase ayant des propriétés très variées. Chacun de ces matériaux aura ses propres propriétés contrairement aux paraffines qui ont des propriétés très similaires. Ils englobent les acides gras, les glycols, les esters et les alcools, etc. Ils constituent particulièrement le plus grand groupe de matériaux candidats pour le stockage de la chaleur latente. Ils englobent les acides gras composés du carbone (C), de l'hydrogène (H) et de

l'oxygène (O). Certaines caractéristiques des matières organiques non paraffiniques sont les suivantes [37]:

- Chaleur de fusion élevée.
- Inflammables.
- Faible conductivité thermique.
- Degré de toxicité différent pour chaque matériau.
- Instabilité à haute température.

Les acides gras ont des valeurs de température de fusion plus élevées par rapport à celles des paraffines et présentent un cycle de fusion-solidification reproductible. La formule générale décrivant tous les acides gras est donnée par  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ . Leurs inconvénients majeurs se résument en deux points : les acides gras ont un coût élevé estimé entre 2 à 2,5 fois supérieur à celui des paraffines, ils sont également légèrement corrosifs. Certains acides gras présentent un intérêt pour les applications de stockage d'énergie thermique à chaleur latente à basse température [42].

#### **1.4.2.3. MCP eutectiques**

Un eutectique est une composition de deux composants ou plus, dont chacun fond et gèle de manière congruente formant un mélange de cristaux de composants pendant la cristallisation. Lors de la fusion, les deux composants se liquéfient simultanément, encore une fois avec une séparation peu probable. Ils sont caractérisés par une conductivité et une densité thermique élevées ainsi qu'une faible capacité de chaleur latente et spécifique [43]. Le pourcentage en poids de chaque matériau peut être modifié pour obtenir des variations de la température de fusion du mélange eutectique résultant [37]. Pour cette raison, ils sont un type de MCP prometteur, même s'ils sont en réalité moins diffusés que les autres groupes.

### **1.5. Applications des MCPs dans les systèmes de stockage d'énergie thermique**

Les différentes applications des MCPs listées ci-dessous ne sont qu'une petite partie de nombreux domaines où elles peuvent être utilisées.

#### **1.5.1. Applications dans le bâtiment**

Depuis longtemps, la propriété de stockage d'énergie fait partie du choix des matériaux de construction. L'intérêt des MCPs dans les matériaux de construction réside dans leur capacité à

exploiter le stockage d'énergie via la transition de phase de chaleur latente plutôt que via un chauffage sensible. La principale propriété des matériaux à changement de phase est le stockage de l'énergie thermique sous une forme latente, conduisant à une plus grande capacité de stockage de chaleur par unité de volume en comparant à celle des matériaux de construction conventionnels. Lorsque la température ambiante augmente, les liaisons chimiques du matériau se rompent, le matériau passant de l'état solide à l'état liquide. Ce changement de phase est un processus endothermique et par conséquent absorbera de la chaleur. Au fur et à mesure que la température ambiante baisse à nouveau, le MCP revient à l'état solide et dégage la chaleur absorbée. Ce cycle stabilise la température intérieure, réduit les charges de refroidissement en heures creuses et diminue les charges de chauffage, sans affecter la résistance thermique de l'enveloppe du bâtiment mais en influençant les températures (de surface).

Fondamentalement, trois manières différentes d'utiliser les MCPs pour le chauffage et la climatisation des bâtiments, en les incorporant dans:

1. Les murs des bâtiments.
2. Les éléments de construction autres que les murs, comme le sol et le plafond.
3. Les unités de stockage de chaleur et de froid situées à l'intérieur des bâtiments au lieu de l'enveloppe (bacs de stockage).

Les principaux procédés pour le stockage d'énergie thermique à chaleur latente dans les bâtiments sont les suivantes.

### **MCP dans les murs des bâtiments**

Parmi les articles publiés sur les MCPs intégrés dans la construction, les auteurs incluent les murs trombes MCP, les panneaux muraux MCP et les blocs de construction MCP qui sont collectivement appelés murs MCP. En fait, le principe est de faire en sorte que les blocs de construction où le MCP devient une partie de la structure du mur, ce qui permet de construire des murs avec une grande inertie thermique.

Des modèles pour diverses conceptions ont été développés pour étudier les performances d'une intégration MCP dans les murs des bâtiments. Meng et al [44] ont appliqué une couche composite de MCP composée de deux MCPs avec des températures de fusion différentes, sur la surface intérieure du mur d'une chambre afin d'améliorer sa performance thermique. Les résultats ont montré une amélioration considérable de la performance thermique pour les deux saisons d'hiver et d'été. Lee et al [45] ont évalué expérimentalement les performances

thermiques des murs comportant une couche de faible épaisseur de MCP. Le MCP était contenu dans des sachets en polymère scellés. Les performances thermiques des murs orientés vers le sud et l'ouest ont été étudiées pour différents emplacements.

### **Système de chauffage au sol**

Le sol est également une partie importante du bâtiment, et son utilisation pour le chauffage et le refroidissement du bâtiment est en cours d'expérimentation. Le principe du système de chauffage par le sol consiste à adopter des MCPs pour obtenir les effets d'une densité de stockage d'énergie élevée à température constante. Lorsque la demande électrique est faible la nuit, les MCPs se chargent. Cependant, les MCPs se déchargent aux heures de pointe pendant la journée. Ainsi, le système de chauffage par le sol peut éviter les pics de demande électrique, tout en présentant une faible fluctuation de la température intérieure et un confort intérieur élevé. Yun et al [46] ont étudié les effets de l'application d'un matériau à changement de phase au chauffage du sol sur le confort thermique. Ils ont utilisé pour un chauffage du sol un MCP macro-emballé (MPPCM). Ils ont montré que les performances de stockage de chaleur d'un MPPCM réduisent de 43 % la quantité d'énergie utilisée pour le chauffage. Le n-eicosane était le MCP le plus efficace pour une utilisation dans le chauffage par le sol en ce qui concerne l'obtention d'une température de sol confortable.

### **Panneaux de plafond**

Les panneaux de plafond sont une partie importante du toit, utilisés pour le chauffage et le refroidissement dans un bâtiment. Le système de plafond assisté par MCP est une application de construction plus utilisée en raison de son installation plus facile et de sa mise en œuvre avec une enveloppe. Pasupathy et Velraj [47] ont étudié la performance thermique du toit d'un bâtiment utilisant un système de stockage thermique à base de MCP eutectique inorganique pour la ville de Chennai (Inde). Un modèle a été développé et validé à partir des résultats expérimentaux. Ils ont montré que dans le but de réduire les variations de température de l'air intérieur et de s'adapter à toutes les saisons, un MCP à double couche incorporé dans le toit est recommandé. Dans le même contexte, Al-Yasiria et Szabób [48] ont étudié expérimentalement l'effet de l'épaisseur d'une couche de matériau à changement de phase (cire de paraffine) incorporée dans une toiture composite (Irak). Différentes quantités de MCP sont encapsulées à l'aide de panneaux métalliques de 10, 15 et 20 mm d'épaisseur. Ils ont constaté que l'épaisseur, la plus épaisse du MCP entraînait de meilleures performances thermiques. Cependant, l'effet

économique doit être pris en compte lors de l'installation d'une grande épaisseur/quantité de MCP.

### **Système de chauffage à air**

Les technologies solaires thermiques ont été largement appliquées dans lesquelles les réchauffeurs d'air solaires jouent un rôle important. Ils sont de conception simple, moins chers que les autres capteurs solaires et utilisent moins de matériaux.

Les capteurs solaires plats absorbent l'énergie solaire et la convertissent en énergie thermique au moyen d'un absorbeur. L'énergie thermique collectée est transférée au fluide circulant à travers le capteur. Les principales applications des réchauffeurs d'air solaires sont le séchage des produits agricoles et le chauffage des bâtiments. Toutefois, le développement de systèmes de stockage d'énergie thermique fiables et pratiques se heurte encore à des obstacles majeurs, tels que des incertitudes concernant le comportement thermique à long terme et le faible nombre de MCP adaptés aux applications à température ambiante.

Socaciu [49] présente un système de chauffage/stockage d'air solaire intégré au toit utilise des tôles de toit ondulées comme capteur solaire pour chauffer l'air. Une unité de stockage thermique MCP est utilisée pour stocker la chaleur pendant la journée afin que la chaleur puisse être fournie la nuit ou lorsqu'il n'y a pas de soleil. Le système fonctionne selon trois modes; pendant les périodes d'ensoleillement et lorsque le chauffage est nécessaire, l'air passe à travers le capteur et par la suite dans la maison. Lorsque le chauffage n'est pas nécessaire, de l'air est pompé dans l'installation de stockage thermique, faisant fondre le MCP et le chargeant pour une utilisation future. Lorsqu'il n'y a pas de soleil, la maison est chauffée par circulation de l'air intérieur dans l'installation de stockage thermique. Lorsque l'installation de stockage est gelée, un chauffage d'appoint au gaz est utilisé pour chauffer la maison fig. 1.2.

Waqas et Kumar [50] ont étudié une unité de stockage MCP connectée avec un capteur solaire de chauffage de l'air des locaux résidentiels dans des conditions hivernales. Les résultats de la simulation considèrent divers débits et températures de fusion du MCP. Ces résultats indiquent que dans la saison hivernale durant laquelle la température de fusion du MCP est égale à la température de confort, les performances de l'unité de stockage sont maximales pour tous les mois de la saison hivernale.

Zeinelabdein et al [51] ont évalué la faisabilité du refroidissement naturel basé sur la technologie des matériaux à changement de phase dans les régions chaudes et arides où la demande de refroidissement est dominante pendant la majeure partie de l'année. Un système de

stockage MCP comprenant un certain nombre de panneaux MCP a été conçu et simulé numériquement. Les résultats montrent que le système proposé est capable de réduire considérablement la charge de refroidissement et que la température de l'air fourni par le système est maintenue dans la zone de confort d'été de 25,5 à 30 °C pendant 14,5 h au cours de la période de décharge. Cependant, les performances du système sont moins efficaces pendant les conditions estivales de pointe. Dans ce cas une combinaison avec d'autres stratégies de refroidissement passif peut être nécessaire.

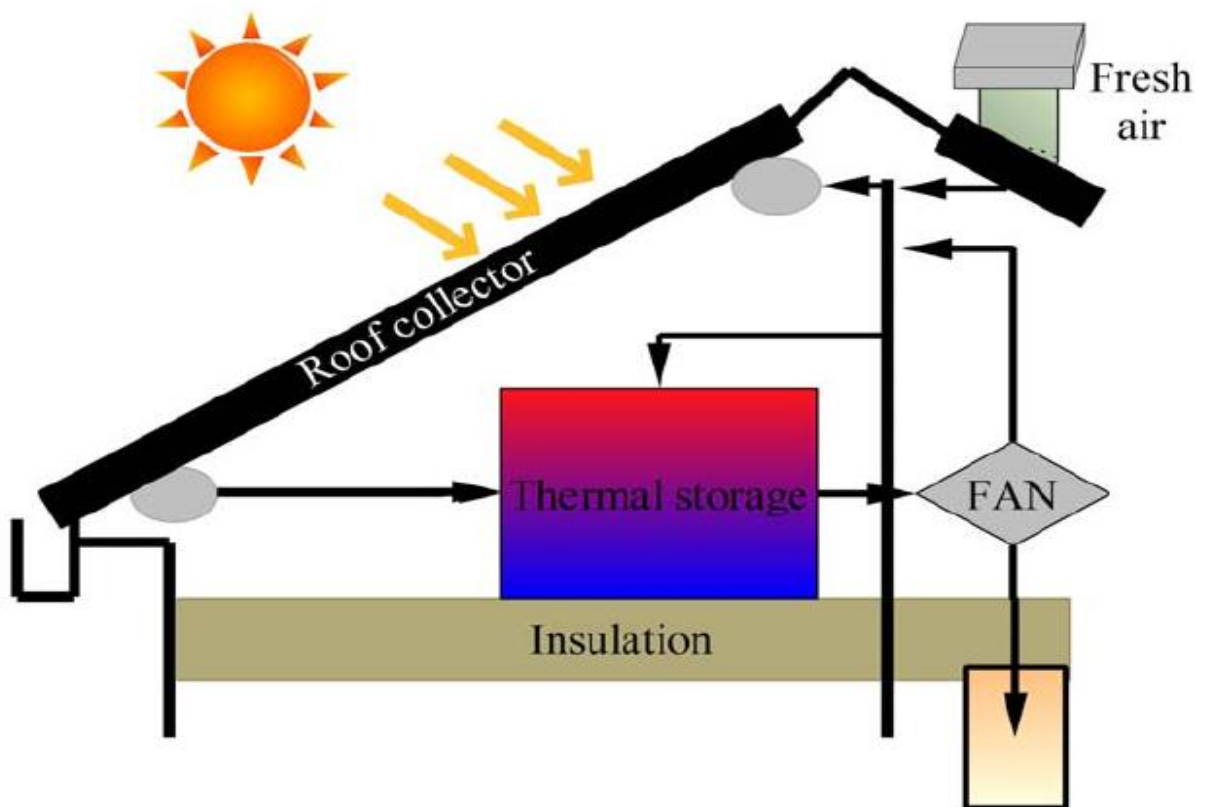


Figure 1.2 : Schéma du système de chauffage solaire [49]

### Volet de fenêtre avec MCP

Il existe également de nombreux travaux de recherche et prototypes utilisant des MCPs dans des composants translucides, pour améliorer les performances thermiques et le confort intérieur des bâtiments. Quelques exemples d'incorporation de MCP dans des systèmes de volets roulants ont pu être trouvés dans la littérature. Silva et al [52] ont testé expérimentalement un volet roulant contenant du MCP pendant la saison estivale. Le prototype d'obturateur a été appliqué dans un test de cellule extérieure composé de deux compartiments (côte à côte) et orienté vers le sud.

### **1.5.2. Applications dans les véhicules**

L'utilisation du stockage d'énergie thermique par l'ajout de matériaux à changement de phase (MCP) est une solution possible pour réduire les élévations de température de l'air à l'intérieur des véhicules en raison de sa capacité à maintenir les matériaux dans une plage de température étroite en absorbant les gains de chaleur.

Oró et al [53] ont mesuré la température intérieure d'un véhicule stationné au soleil lorsqu'un système de stockage d'énergie thermique est placé à l'intérieur de la voiture. Le MCP a été placé sous le toit de la voiture et sur le volant. Les résultats ont montré que l'utilisation du MCP permet d'abaisser la température de l'air intérieur et de la surface du volant et d'augmenter le confort thermique des passagers. Purusothaman et al [54] ont présenté une nouvelle conception de la structure du toit du véhicule, réalisée en ajoutant une couche de MCP dans le toit du véhicule afin de maintenir une température modérée dans le véhicule. Il utilise les propriétés des matériaux à changement de phase pour piéger la chaleur du rayonnement solaire, qui sera ensuite restituée à l'atmosphère extérieure par convection externe lorsque le véhicule est en cours d'utilisation ou pendant le cycle nocturne. Les résultats montrent que la nouvelle structure du toit pourrait réduire efficacement l'entrée de chaleur du toit dans la cabine. En conséquence, la température intérieure de la cabine pourrait être considérablement plus basse.

### **1.5.3. Applications aux refroidissements des composants électroniques**

Afin de supprimer les pics de température dans les composants électroniques qui pourraient endommager l'équipement, durant les pics de charge ou à cause des courts-circuits électroniques, Maxa et al [55] ont eu l'idée d'utiliser un matériau à changement de phase dans le but de réduire les pics thermiques dans les composants électroniques. Le revêtement de matériau à changement de phase peut être appliqué directement sur le boîtier du composant ou sur la carte du circuit à l'aide de différents modèles de retenues mécaniques. Les premiers résultats ont montré une solution réalisable pour l'objectif de trouver un revêtement pour les applications des circuits électronique imprimés en tant que matériau limitant la température, en s'appuyant sur le stockage de la chaleur sensible et latente. Kandasamy et al [56] ont appliqué un nouveau package MCP pour la gestion thermique des appareils électroniques portables. L'étude expérimentale a noté les effets de divers paramètres, tels que la puissance absorbée et l'orientation de l'emballage. Les résultats ont montré que l'orientation a un effet négligeable sur les performances thermiques du boîtier MCP et que la conception basée sur le MCP est

prometteuse pour les applications de refroidissement électronique. Une autre étude expérimentale a été faite par Baby et Balaji [57] pour explorer les caractéristiques des dissipateurs thermiques à base de matériaux à changement de phase sur le refroidissement des équipements électroniques. Les auteurs ont utilisé des ailettes broches afin d'améliorer la conductivité thermique des MCP. Différentes géométries de dissipateur thermique à ailettes remplies de matériaux à changement de phase ont été utilisées sous une charge thermique uniforme appliquée. Ils ont conclu qu'un transfert efficace de chaleur dû à un grand nombre d'ailettes uniformément réparties est principalement responsable des rapports d'amélioration plus élevés pour les dissipateurs thermiques à ailettes. Un facteur d'amélioration de 21 est obtenu pour un dissipateur thermique avec des ailettes à 72 broches. Dans le même contexte de refroidissement des composants électroniques, Laura Colla et al [58] ont utilisé des nano-MCP de 0,5 et 1,0 % en poids de nanoparticules d'oxyde d'aluminium dans deux cires de paraffine ayant des températures de fusion de 45 et 55 °C, respectivement. Ils ont montré que les nano-MCP engendrent un retard dans le processus de fusion par rapport aux MCPs purs.

Les unités de stockage thermique par chaleur latente peuvent avoir différentes formes géométriques ainsi que différents matériaux de stockage. Les tableaux suivants résument les principaux travaux de recherche concernant ce thème.

## 1.6. Différents modèles géométriques de l'unité de stockage thermique

### 1.6.1. Unités rectangulaires

Réf	Milieu MCP	Méthode	Conclusion
[59]	lauric acid	num.	L'orientation joue un rôle important dans le phénomène de fusion. L'effet de la convection naturelle ainsi que le problème de la stratification thermique affectent les performances thermiques du système.
[60]	cuivre-eau	num.	Le temps de fusion augmente pour des valeurs élevées de $Ha$ et $Ra$ . L'ajout de nanoparticules à faible $Ra$ conduit à une fusion plus rapide. Pour $Ra=10^5$ sans MF ( $Ha=0$ ), le temps de fusion diminue et les influences des paramètres examinés deviennent importantes pour $Fo>0,5$ .
[61]	(CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O) RT25	num.	Les couches de MCP, les plus longues et les plus minces présentent les meilleures performances thermiques. Le taux de fusion ainsi que la température de sortie de l'air augmentent avec le débit d'air qui s'écoule entre les couches MCP.
[62]	gallium	num.	La convection naturelle joue un rôle important dans le processus de fusion. La vitesse de fusion augmente avec l'augmentation des valeurs du nombre de Rayleigh
[63]	acide laurique	num./exp.	Développement de nouvelles corrélations pour la prédiction de la fraction liquide instantanée, du stockage d'énergie et du nombre de Nusselt moyenné en fonction du temps dans des enceintes inclinées.
[64]	RT25	num.	Le comportement thermique optimal a été obtenu lorsque l'enceinte MCP est équipée d'une ailette occupant toute la largeur de l'enceinte.
[65]	paraffine	num.	Le comportement thermique optimal est atteint pour $AR= 0.5$ , $\theta = 0^\circ$ , et quatre ailettes, où le temps de stockage thermique est réduit de plus de 40%. Une forte augmentation de la température du liquide avec de fortes oscillations du nombre de Nusselt local sont enregistrées à cause de la convection naturelle.
[66]	eau	num.	Le changement de phase dépend des paramètres thermiques et géométriques du système. L'approche physique basée purement sur la conduction reste valide dans les cas de faibles valeurs du nombre Grashof et du rapport hauteur / largeur.

[67]	eau	num./exp.	Une solidification plus rapide ainsi qu'une capacité de stockage d'énergie et un flux de chaleur élevés sont enregistrées pendant la fusion pour le pack MCP de 6,5 cm d'épaisseur avec un nombre élevé d'ailettes.
[68]	RT25	num.	Pour un nombre d'ailettes élevé, les ailettes les plus minces et les plus longues accélèrent le stockage sensible et latent de l'énergie dans le MCP. Pour un même nombre d'ailettes, l'espacement des ailettes a un faible impact sur les performances de stockage de chaleur latente.
[69]	cire de paraffine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	num.	L'énergie thermique stockée par le MCP peut être améliorée en changeant l'orientation des parois thermiquement actives de l'enceinte, en dispersant des nanoparticules ou en appliquant les deux simultanément. L'amélioration la plus importante est obtenue pour une enceinte remplie de nanoparticules d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> de concentration volumique $\phi = 1\%$ et chauffée par le bas.
[70]	octadecane nanoparticules simples et hybrides	num.	La fraction volumique des nanoparticules et la conductivité thermique peuvent affecter significativement la fraction liquide et l'interface solide-liquide. De plus, la vitesse de fusion est significativement élevée lorsque le nombre de Fourier change entre 0 et 0,5.
[71]	RT 58 mousse de cuivre	num.	la présence d'un milieu poreux augmente considérablement le transfert de chaleur, mais l'amélioration des performances de fusion est fortement liée aux dimensions du système.

**1.6.2. Unités sphériques**

Réf.	Milieu MCP	Méthode	Conclusion
[72]	eau dé-ionisée gélose gélatine fécule de maïs	exp.	Utilisation des épaississants organiques, le sous-refroidissement est réduit et la vitesse de cristallisation est augmentée permettant au MCP encapsulé sphériquement de stocker plus d'énergie dans un laps de temps plus court.
[73]	erythritol	théo./num.	Le processus de solidification est affecté par le diamètre et la différence de température $\Delta T$ .
[74]	RT35 RT 55 RT 82	num.	Le diamètre de la sphère et le $\Delta T$ ont un effet important sur le temps de fusion. Un petit diamètre et un grand $\Delta T$ conduisent à un temps de fusion plus court.
[75]	$\text{NaNO}_3$	num.	Le choix approprié des nombres de Grashof et de Stefan pouvait améliorer la vitesse de fusion. Etablissement d'une corrélation pour la fraction massique liquide et le nombre de Nusselt pendant le processus de fusion du nitrate de sodium sur la base de nombres adimensionnels
[76]	eau potable	num.	La méthode $\varepsilon$ -NTU a été appliquée à l'étude d'optimisation de MCP encapsulé dans une sphère Les résultats des processus de charge et de décharge de la méthode efficacité-nombre d'unités de transfert ( $\varepsilon$ -NTU) ont été validés numériquement avec le modèle de simulation Ansys
[77]	n- eicosane Nanoplaquettes de graphite	exp.	Développement d'une corrélation du temps de solidification adimensionnel en tenant compte du mode de chauffage ou de refroidissement externe

**1.6.3. Unités annulaires**

Réf.	Milieu MCP	Méthode	conclusion
[78]	N-eicosane	num.	Au début de la fusion ( $t < 15$ min), le taux de fusion est relativement le même pour le modèle concentrique et excentrique. Ensuite, ce taux diminue dans le cas concentrique. Le déplacement du cylindre intérieur vers le bas conduit à accélérer le temps de fusion. Dans ce cas l'espace supérieur s'est élargi permettant au MCP liquide de s'écouler et à la convection naturelle de se produire librement.
[79]	RT82	num./exp.	La durée de la fusion complète utilisant un échangeur de chaleur à tube triplex avec des ailettes internes-externes plus longues était réduite de 43,3% par rapport au tube triplex sans ailettes.
[80]	RT82	num.	Le facteur le plus important sur le temps de fusion est le nombre d'ailettes.
[81]	RT82	num.	L'impact de l'emplacement des ailettes sur la fusion est considérablement important dans les échangeurs de chaleur de type triplex. Une meilleure disposition des ailettes pourrait améliorer le temps de fusion de 17,9%.
[82]	paraffine (RT82) $Al_2O_3$	num./exp.	La solidification avec un angle $\theta = 90^\circ$ présente de meilleures performances thermiques que l'angle $\theta = 270^\circ$ . Une amélioration est obtenue pour l'échangeur avec des ailettes longitudinales et l'échangeur avec des ailettes triangulaires sous l'effet de 10 % de nanoparticules.
[83]	$NaNO_3$	num.	Au début du processus de fusion, la conduction thermique était le mode dominant de transfert de chaleur. Ensuite, la convection naturelle joue un rôle plus important dans le processus. Concernant, la solidification, la conduction thermique était le mécanisme de transfert de chaleur dominant pendant tout le processus. Le temps de charge était plus rapide que le temps de décharge

**1.6.4 Unités innovantes**

Réf.	géométrie du système	Milieu de stockage	Méthode	Conclusion
[84]	cylindre sphère cube	thiosulfate de sodium pentahydraté	exp.	La forme cylindrique des capsules conduite à des meilleures performances thermiques.
[85]	tube-calandre	paraffine	num.	Une diminution du temps global de charge de 40% est constatée dans le modèle d'un chauffage combiné par rapport à celui d'un chauffage simple.
[86]	cavité trapézoïdale	cire de paraffine Graphène	num.	L'effet de l'orientation de la cavité et l'ajout des nanoparticules sont bénéfiques pour l'amélioration du transfert de chaleur dans les MCP
[87]	Système en nid d'abeille	cire de paraffine	num.	Un rapprochement dans les résultats pour les valeurs les plus élevées de canaux par unité de longueur (CPL). Une différence considérable est constatée pour les petites valeurs de CPL ( $CPL \leq 4$ ).
[88]	batterie cylindrique	paraffine	num.	La convection naturelle dans le milieu poreux est faible et la conduction représente le mode transfert de chaleur le plus dominant. une diminution de la porosité accélère la vitesse de fusion. Lorsque la porosité prend les valeurs de 0,9, 0,8, 0,7 et 0,6, le temps de fusion totale réduit consécutivement de 23,7%, 43,3%, 58,0% et 75,4%, par rapport au MCP pur.
[89]	capsules elliptiques	N-octadécane Paraffine Cu	num.	Pour un nombre d'aspect (AR) donné, la présence de nanoparticules améliore la vitesse de fusion et diminue le changement de volume de MCP nano-amélioré par rapport au cas MCP pur. Les taux de fusion les plus élevés et les plus bas sont associés respectivement à $AR = 2.0$ et $AR = 1.0$ .
[90]	canal ondulé	RT-35 mousse de cuivre	num.	Le temps total de fusion et de solidification peut être considérablement réduit jusqu'à 91,4% et 96,7% lors de l'utilisation de structures poreuses à

		composite-MCP		haute conductivité et d'un canal ondulé par rapport au système d'un MCP pur à canal lisse.
--	--	---------------	--	--

### **1.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté les différents modes de stockage thermique, en se basant sur le stockage d'énergie thermique par chaleur latente. À cet égard, dans cette partie, notre recherche s'est focalisée sur les différents types de matériaux à changement de phase, tout en abordant leurs avantages et inconvénients. Dans la dernière partie, on a résumé les différents travaux se rapportant aux systèmes de stockage d'énergie thermique par chaleur latente.

## Chapitre 2

# **Formulation mathématique et validations numériques**

## Chapitre 2

### Formulation mathématique et validations numériques

#### 2.1. Introduction

La conception thermique et la simulation du changement de phase à l'intérieur d'une conduite annulaire nécessitent une analyse approfondie pour mieux comprendre les effets de la convection naturelle sur les performances thermiques et pour mieux suivre le front de fusion tout au long du processus. Cependant, selon une revue récente [91], ANSYS Fluent est le logiciel le plus largement utilisé. Dans le présent travail, une étude numérique du modèle développé a été réalisée en utilisant ce dernier. Dans ce chapitre, nous allons aborder la modélisation mathématique et le traitement numérique de la fusion d'un MCP. Les prédictions numériques sont validées par comparaison avec des données expérimentales et des résultats numériques rapportés dans la littérature.

#### 2.2. Modélisation mathématique

##### 2.2.1. Modèle physique

Un problème bidimensionnel de la fusion d'un MCP (n-icosane) est considéré dans une conduite annulaire. Un schéma d'une section transversale de ce système est représenté dans la figure 2.1. Les deux tubes sont en cuivre. Le tube intérieur de rayon 10 mm est maintenu à une température chaude constante  $T_c=70^\circ\text{C}$ , tandis que le tube extérieur ayant un rayon de 20 mm est considéré comme adiabatique. Le MCP est initialement à l'état solide à  $T_{ini} = 23^\circ\text{C}$ .

Pour augmenter le taux de transfert de chaleur et assurer une conductivité thermique élevée, des ailettes rectangulaires en cuivre de 8 mm de long et 1 mm d'épaisseur ont été fixées au tube intérieur. Tous les cas étudiés sont illustrés dans la figure 2.2

On peut noter que la circulation du fluide et le transfert de chaleur sont symétriques par rapport à l'axe vertical du système annulaire.

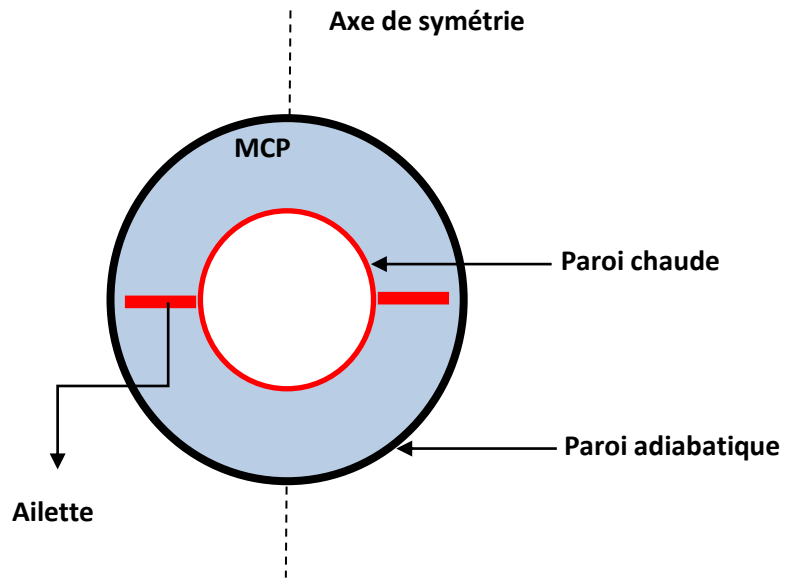


Figure 2.1. Représentation schématique de l'échangeur de chaleur à tube annulaire

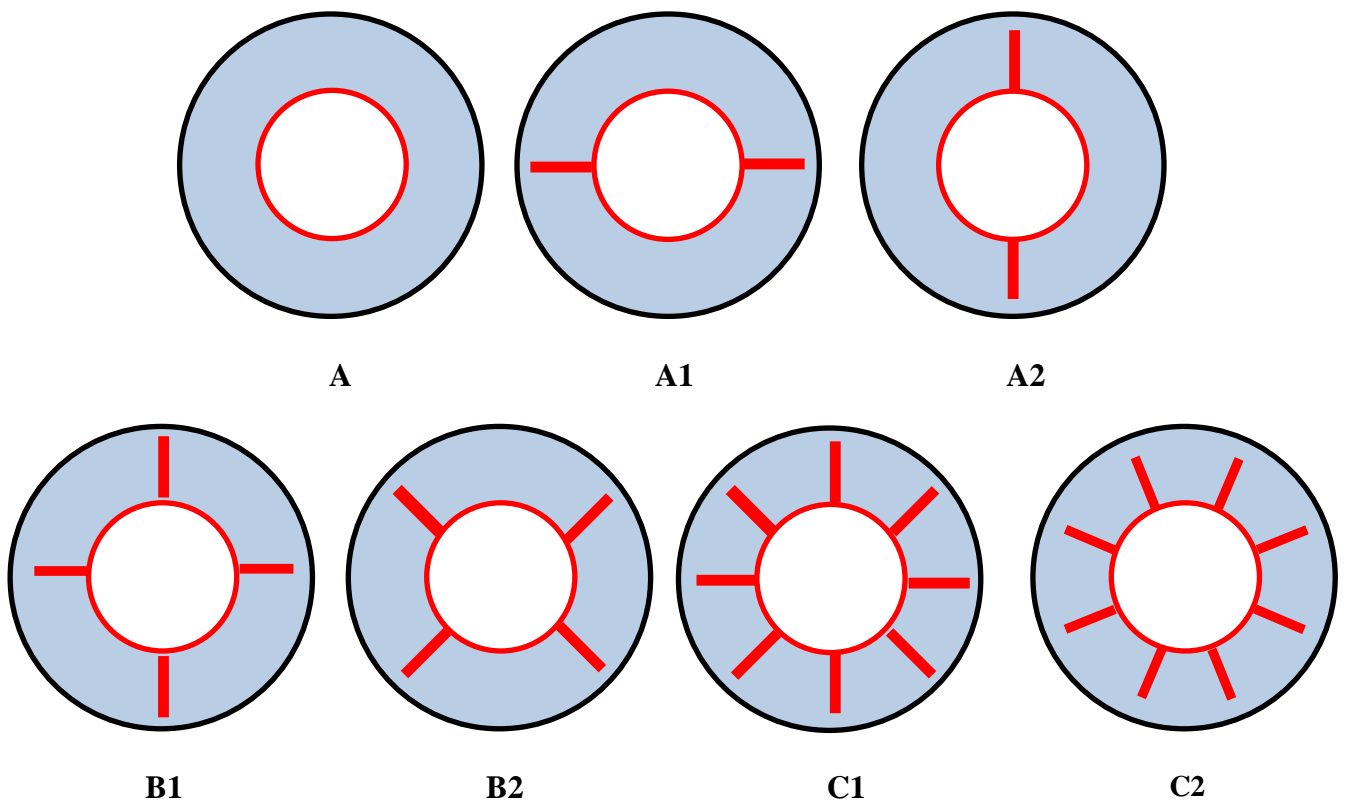


Figure 2.2. Représentation schématique des cas étudiés.

### 2.2.2. Propriétés thermophysiques du MCP

Le matériau à changement de phase utilisé dans les calculs est le n-eicosane, ses propriétés thermo-physiques sont données dans le tableau 2.1 [92].

La zone pâteuse où le matériau procède la transition d'un état à un autre ( $T_{sol} \leq T \leq T_{liq}$ ) se caractérise par une très petite plage de température (0.1 K). Pour bien définir les propriétés du matériau durant le processus de fusion, les propriétés devaient dépendre de la température.

**Tableau 2.1** : Propriétés thermophysiques du n-eicosane [92]

Propriétés physiques	Solide ( $T \leq T_{sol}$ )	Liquide ( $T \geq T_{liq}$ )
Masse volumique, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	910	769
Conductivité thermique, $k$ (W/m.K)	0.423	0.146
Chaleur spécifique, $c_p$ (J/kg.K)	1926	2400
Coefficient de dilatation thermique, $\beta$ (K <sup>-1</sup> )	8.161 × 10 <sup>-4</sup>	
Température de fusion, $T_f$ (°C)	36.4	
Chaleur latente, $L$ (kJ/kg)	248	
Plage de température de la zone pâteuse, $\Delta T$	0.1	
Température du solidus, $T_{sol}$ (K)	$T_f - \Delta T / 2$	
Température du liquidus, $T_{liq}$ (K)	$T_f + \Delta T / 2$	
Température de référence, $T_{ref}$	$T_{liq}$	

### 2.3. Formulation mathématique

Le modèle mathématique utilisé pour exprimer le processus de fusion est réalisé en utilisant la méthode d'enthalpie-porosité [93, 94]. La modélisation se base sur les hypothèses suivantes :

- Le fluide dans la phase liquide du MCP est newtonien.
- L'écoulement est bidimensionnel, laminaire, instationnaire et incompressible.
- La dissipation visqueuse est négligeable.

- L'approximation de Boussinesq est appliquée pour les effets de flottabilité [95] :

$$\rho = \rho_{liq} [1 - \beta(T - T_{liq})]$$

- La surchauffe et l'expansion du volume dues au changement de phase sont négligeables.

Les équations régissant la solution du problème sont exprimées comme suit :

Équation de continuité :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.1)$$

Équation de la quantité de mouvement :

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\nabla \mathbf{u})\mathbf{u} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{S} \quad (2.2)$$

Équation d'énergie :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla(\rho \mathbf{u} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2.3)$$

Où  $\mathbf{u}$  est la vitesse,  $p$  est la pression,  $g$  est l'accélération gravitationnelle et  $t$  représente le temps.  $H$  désigne l'enthalpie, elle est égale à la somme de l'enthalpie de la chaleur sensible ( $h$ ) et de la chaleur latente ( $\Delta H$ ), et elle est définie comme suit :

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (2.4)$$

$$\Delta H = \phi L \quad (2.5)$$

$$H = h + \Delta H \quad (2.6)$$

La température de référence,  $T_{\text{ref}}$ , est celle du liquide où les effets de flottabilité sont présents. Le terme source en (2.2) est défini comme :

$$\mathbf{S} = -A(\phi)\mathbf{u} \quad (2.7)$$

Avec  $\phi$  la fraction liquide définie comme suit :

$$\begin{cases} \phi = 0 \text{ if } T \leq T_{sol} \\ \phi = \frac{T - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}} \text{ if } T_{sol} < T < T_{liq} \\ \phi = 1 \text{ if } T \geq T_{liq} \end{cases} \quad (2.8)$$

Et A la fonction de porosité [96] :

$$A(\phi) = \frac{C(1-\phi)^2}{\phi^3 + \varepsilon} \quad (2.9)$$

Dans l'équation ci-dessus,  $C$  est une constante caractérisant dans la région pâteuse,  $\varepsilon$  est un nombre infiniment petit utilisé dans les simulations pour éviter la division par zéro.

#### 2.4. Procédure numérique et validation

Les équations du modèle mathématique sont résolues par ANSYS-FLUENT. La procédure de la résolution du code CFD est représentée dans le schéma suivant (fig. 2.3). Les UDF (fonctions définies par l'utilisateur) sont implémentées pour tenir compte des propriétés thermophysiques dépendantes de la température [92]. La discrétisation du schéma second order-upwind est utilisée pour les équations gouvernantes avec l'algorithme SIMPLE tandis que l'algorithme PRESTO a été utilisé pour la correction de la pression. Trois valeurs du pas de temps différentes (0,01 s, 0,05 s et 0,1 s) ont été testées pour la température transitoire moyenne (fig. 2.4). Les pas de temps 0.01 et 0.05 affichent des résultats quasi-identiques, par conséquent le pas de temps 0.05 est utilisé. En outre, le critère de convergence pour l'ensemble des variables est fixé à  $10^{-4}$ .

Pour créer le maillage, on a utilisé l'algorithme de maillage du modélisateur de conception ANSYS intégré, un maillage structuré a été utilisé avec des cellules plus fines près du tube intérieur chaud (figs. 2.5-2.8). Pour étudier l'indépendance du maillage et montrer l'effet de son adaptation sur les solutions numériques, on a considéré différents types de maillage pour différents nombres d'éléments pour chaque configuration (figs. 2.9-2.15). Finalement le tableau 2.2 montre la résolution du maillage considéré pour chaque cas étudié. Le petit nombre  $\varepsilon$  dans l'équation (2.9) est fixé égale à  $10^{-3}$  [97] pour éviter la division par zéro. La constante de zone pâteuse, notée  $C$ , est généralement comprise entre  $10^4$  et  $10^7$  [79], et dans les présentes simulations, nous avons choisi  $C=10^5$ .

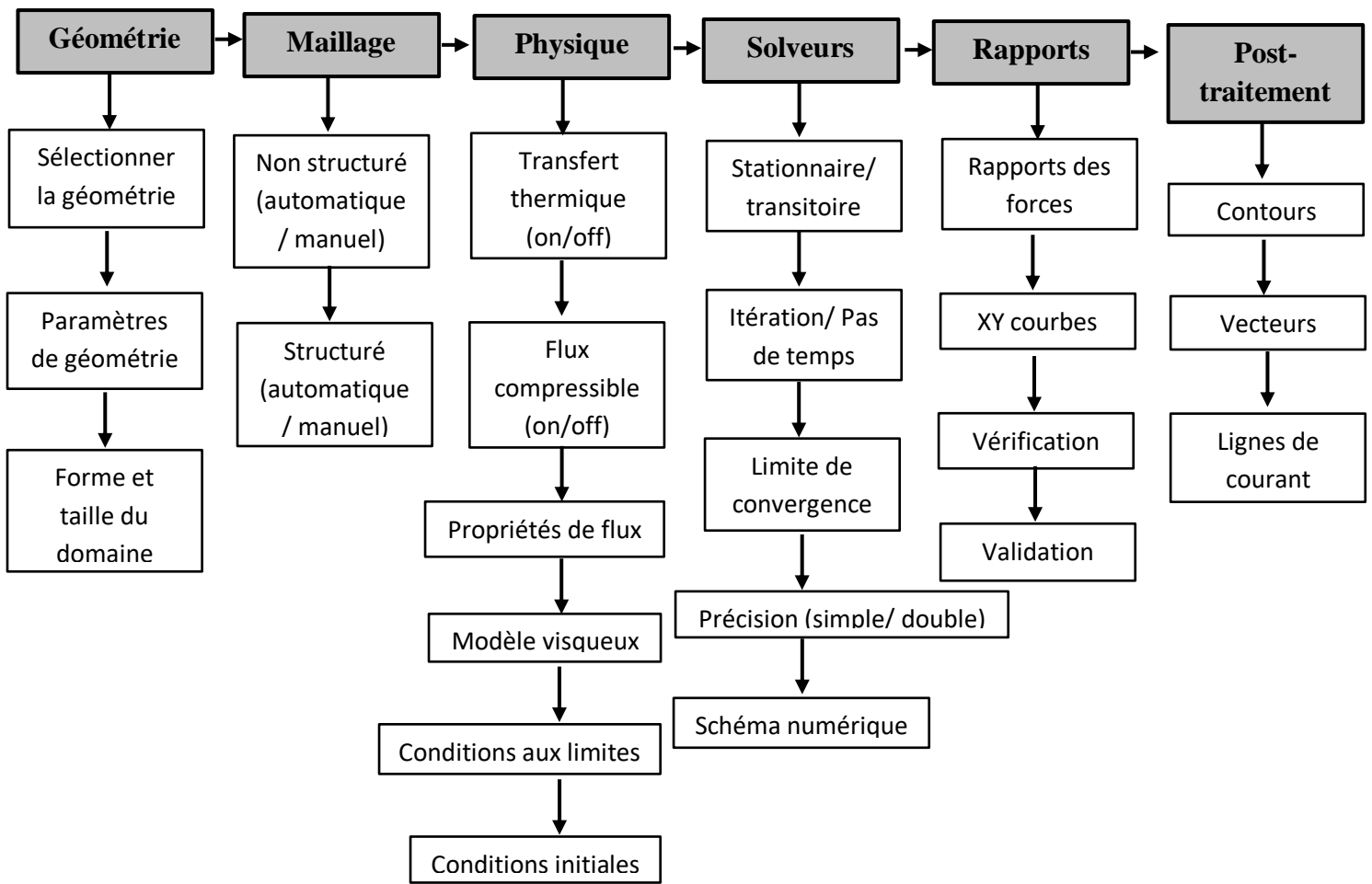


Figure 2.3 : Schéma du processus de solution CFD [91]

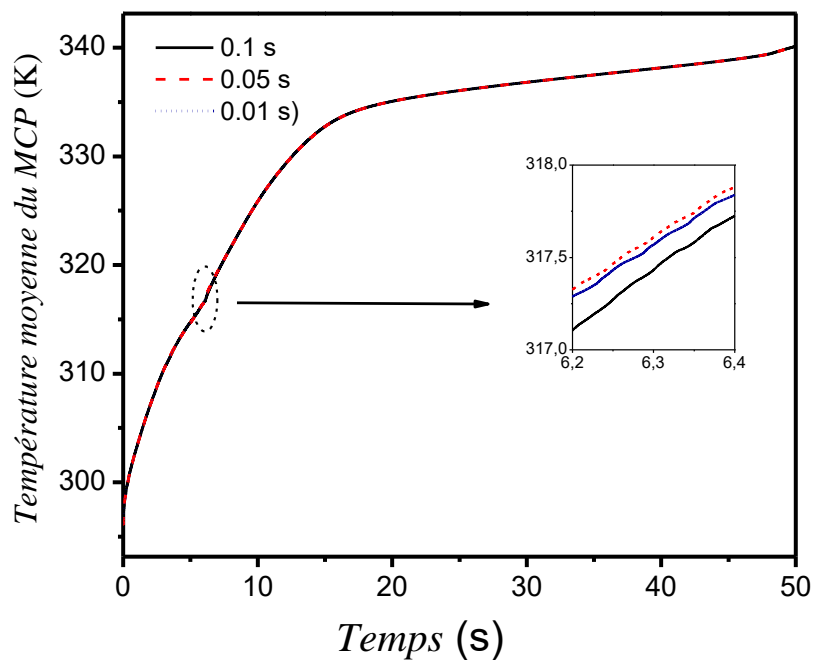
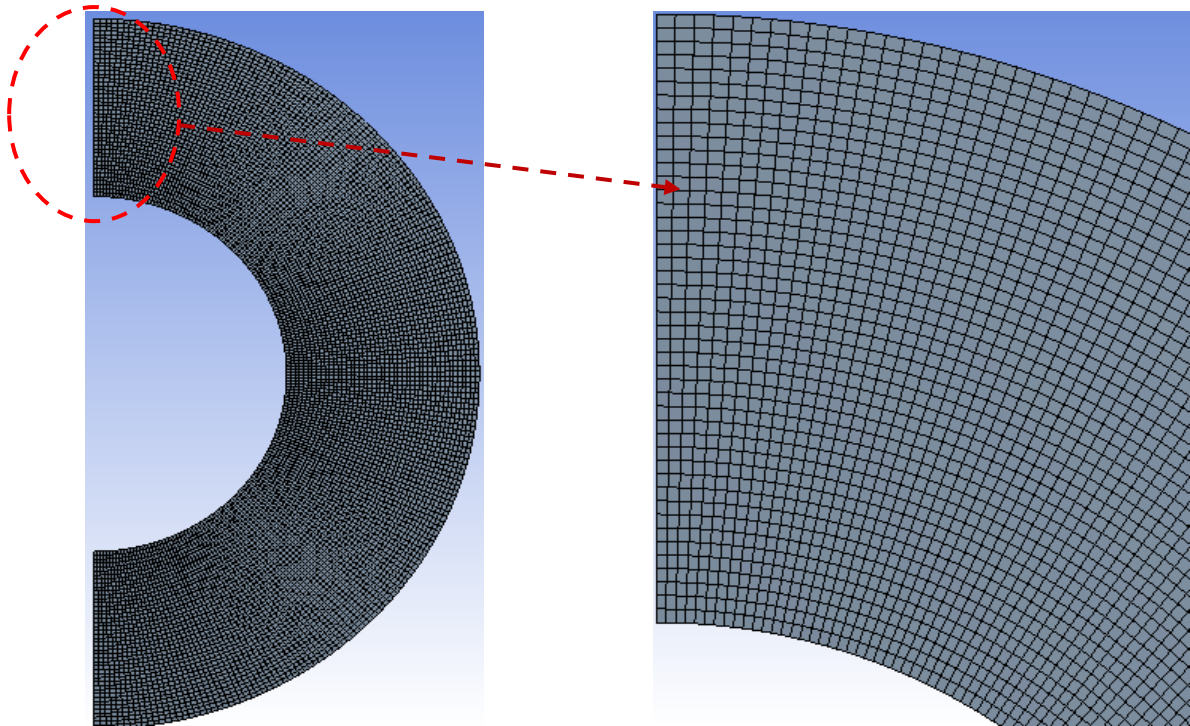
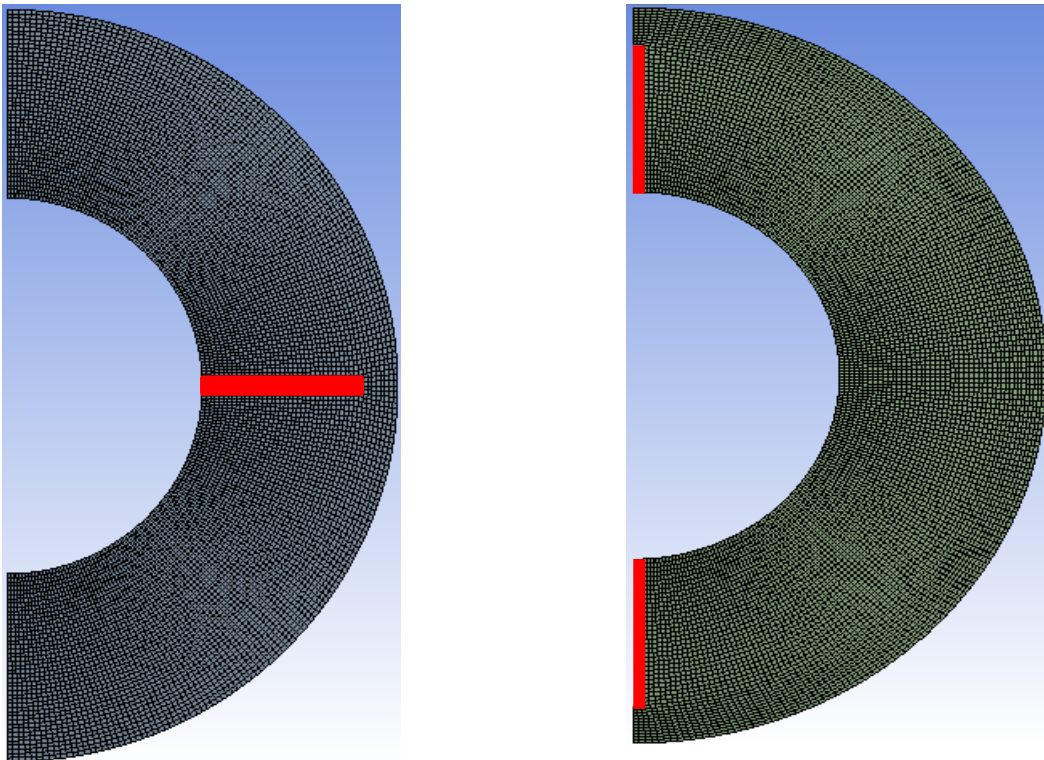


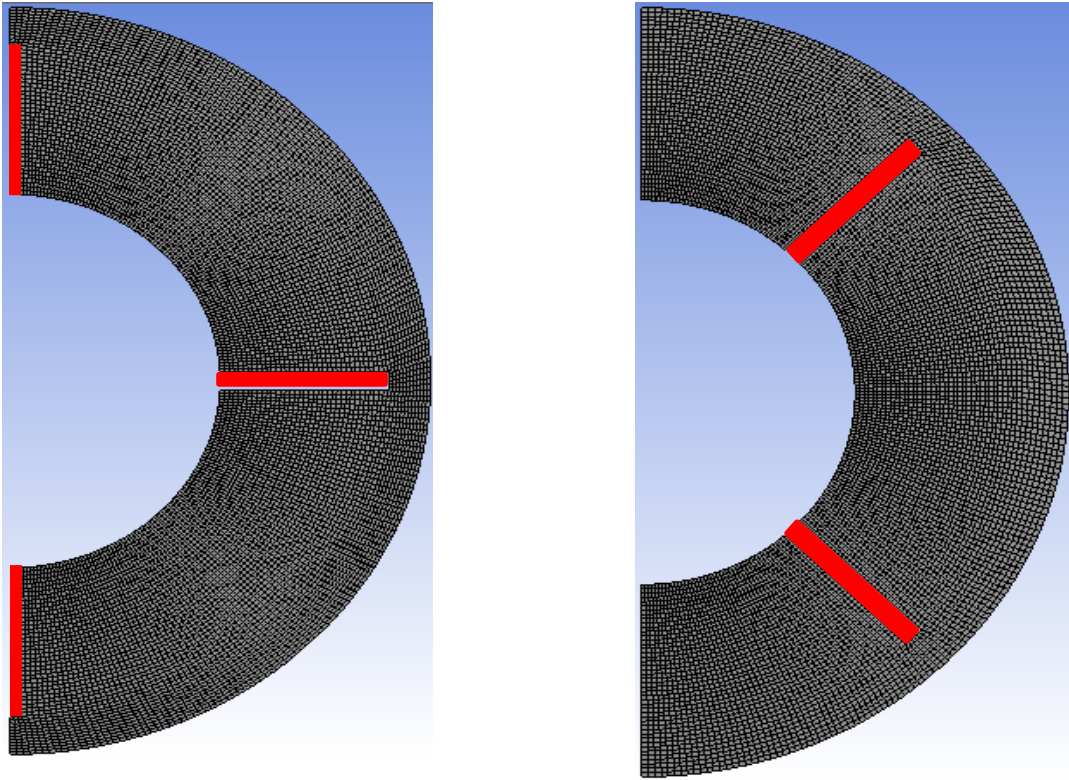
Figure 2.4 : Optimisation du pas de temps



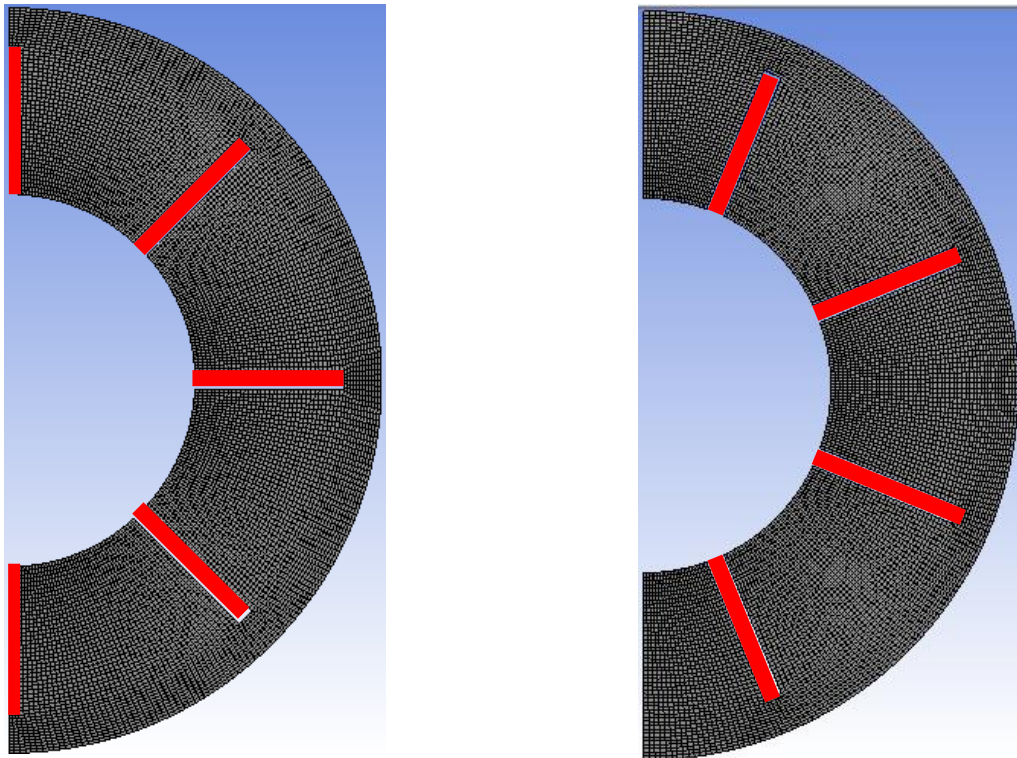
**Figure 2.5 :** Présentation du maillage pour le cas A



**Figure 2.6 :** Présentation du maillage pour le cas A1 (à gauche) et A2 (à droite)



**Figure 2.7** : Présentation du maillage pour le cas B1 (à gauche) et B2 (à droite)



**Figure 2.8** : Présentation du maillage pour le cas C1 (à gauche) et C2 (à droite)

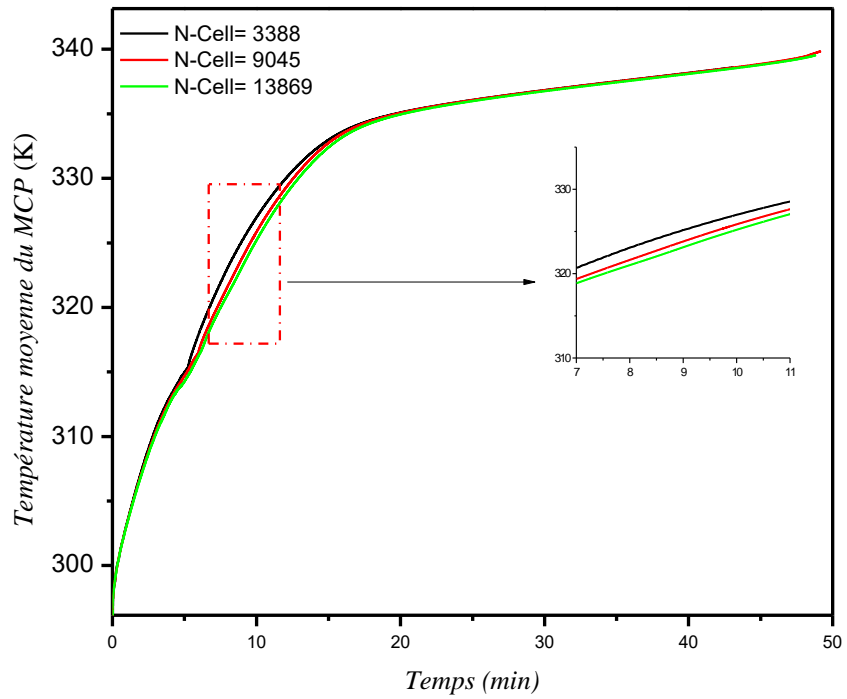


Figure 2.9 : Dépendance du maillage aux prédictions numériques pour le cas A

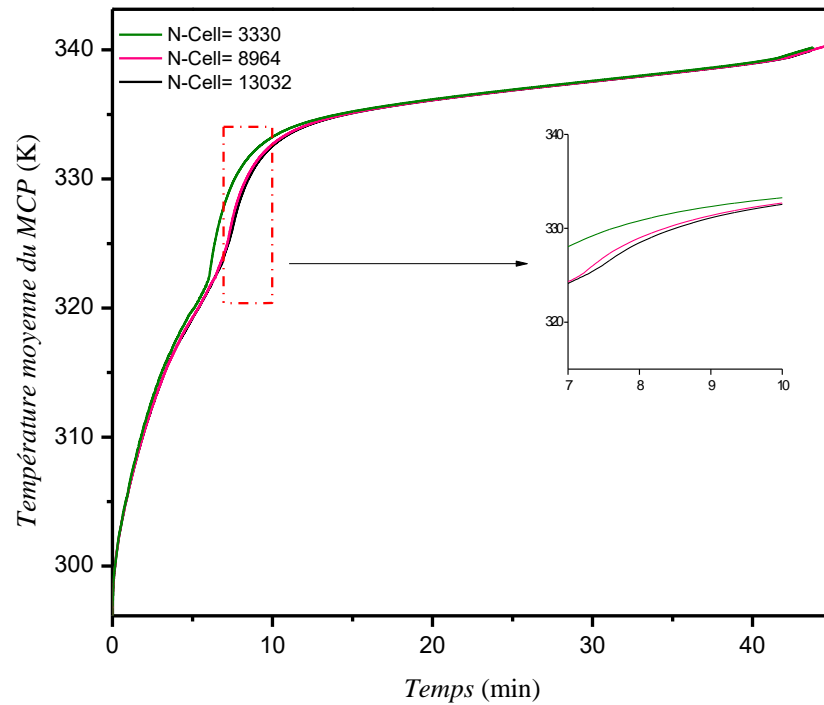


Figure 2.10 : Dépendance du maillage aux prédictions numériques pour le cas A1

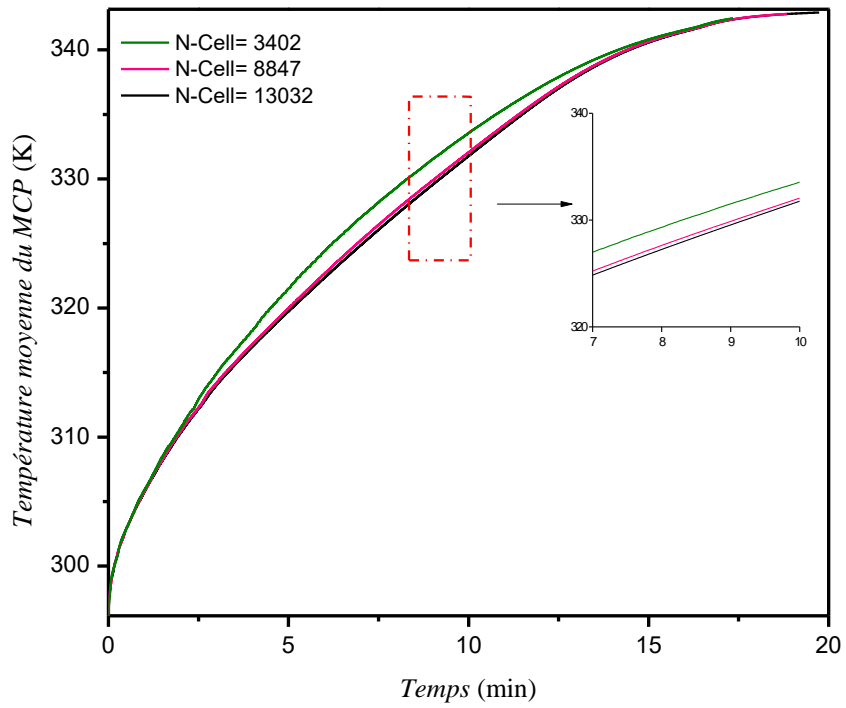


Figure 2.11 : Dépendance du maillage aux prédictions numériques pour le cas A2

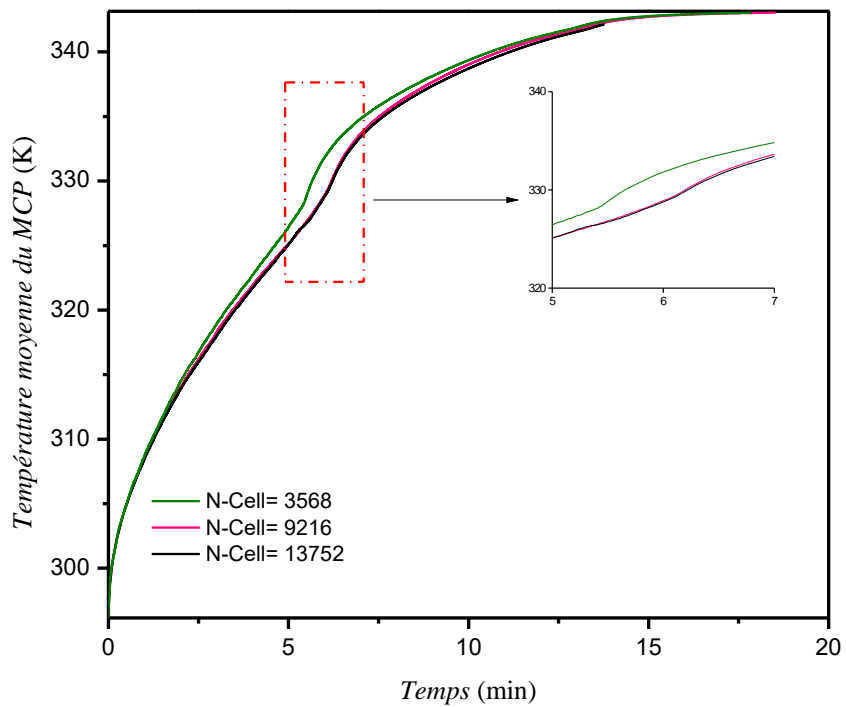


Figure 2.12 : Dépendance du maillage aux prédictions numériques pour le cas B1

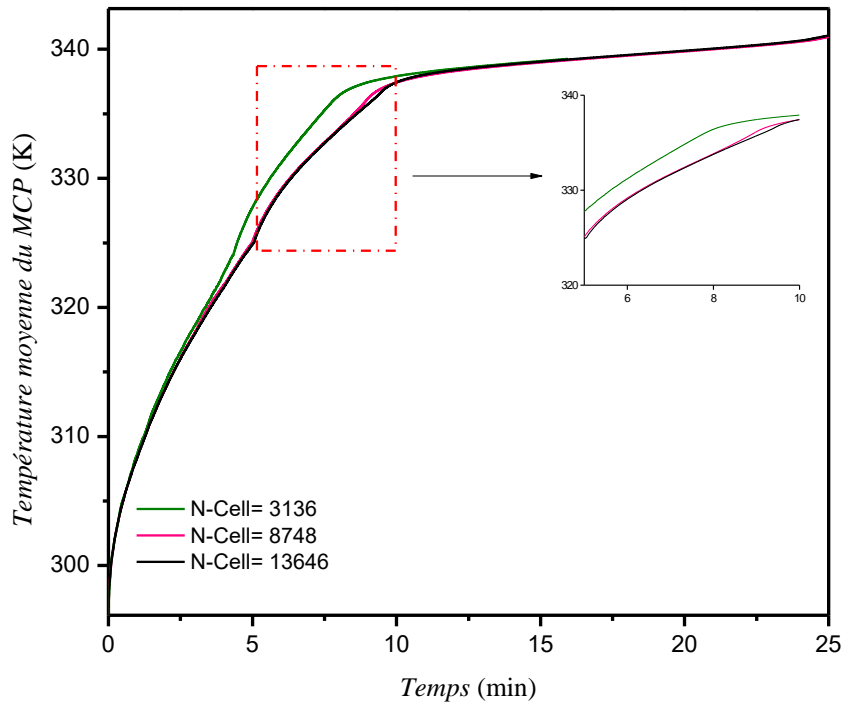


Figure 2.13 : Dépendance du maillage aux prédictions numériques pour le cas B2

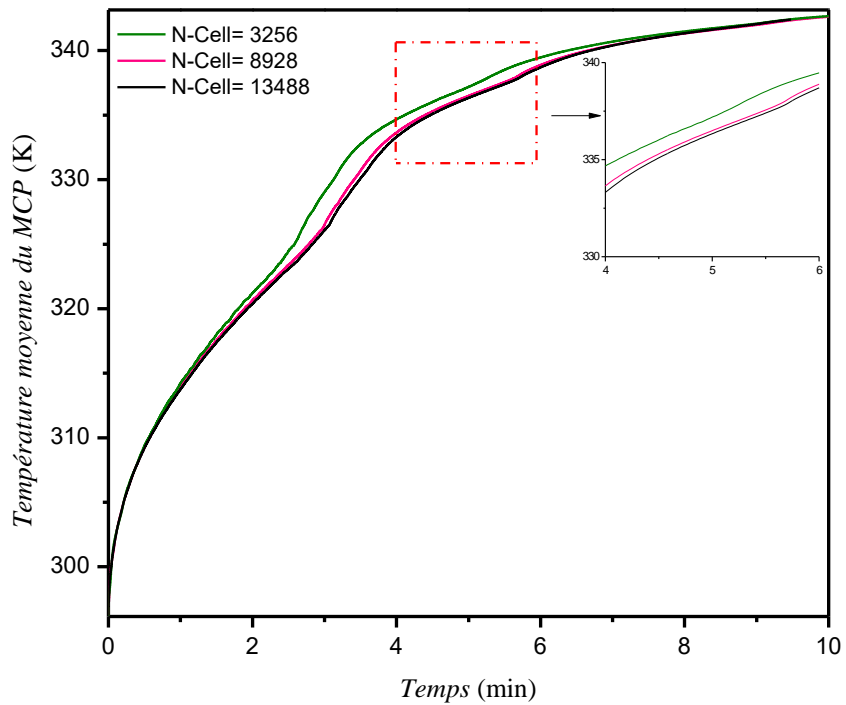
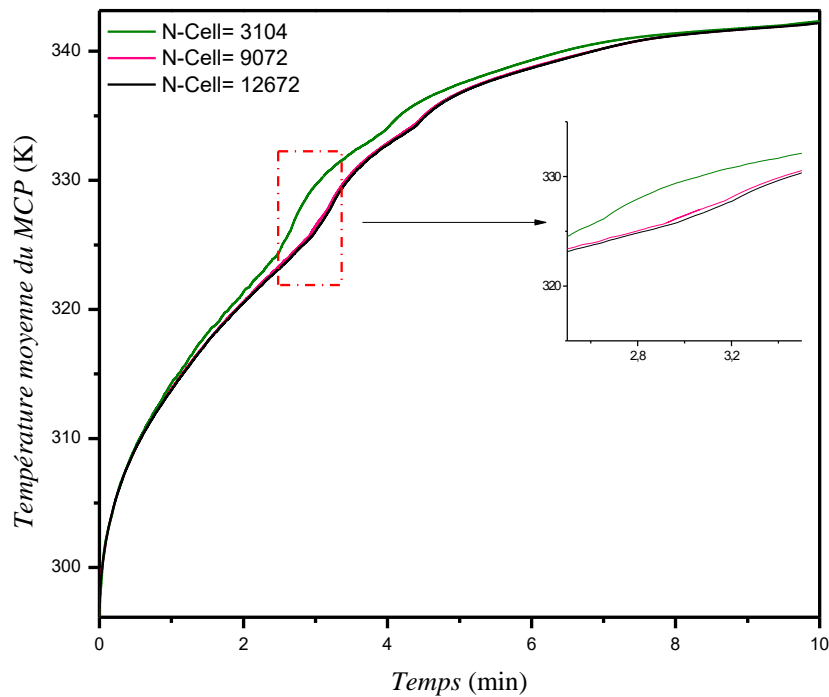


Figure 2.14 : Dépendance du maillage aux prédictions numériques pour le cas C1



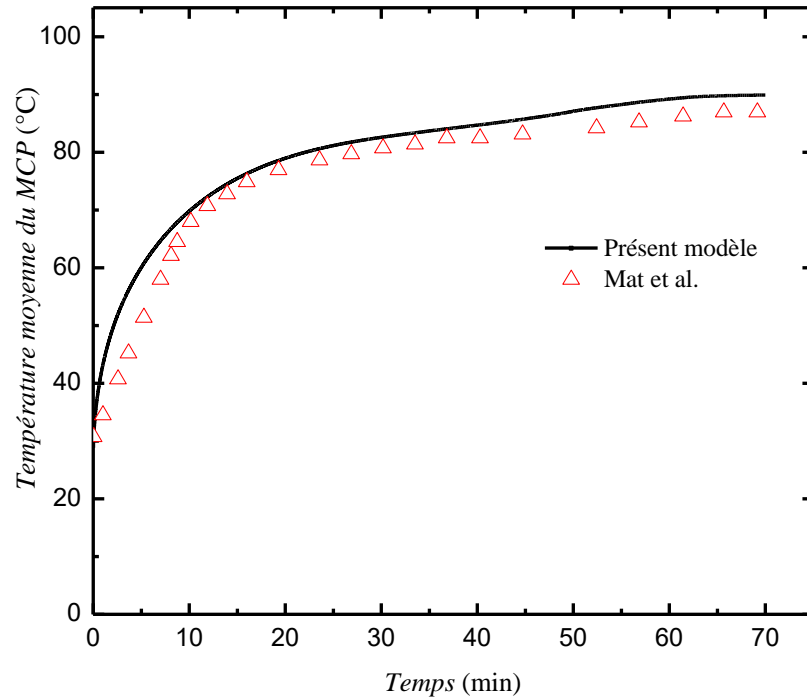
**Figure 2.15 :** Dépendance du maillage aux prédictions numériques pour le cas C2

**Tableau 2.2:** Nombres d'éléments utilisés pour chaque cas

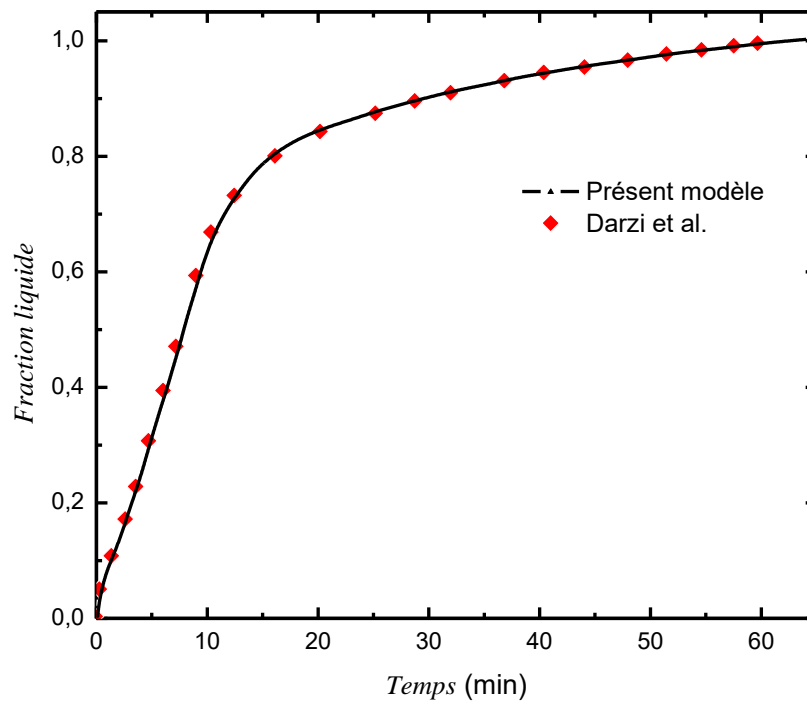
Cas	Nombres d'éléments
A	9045
A1	8847
A2	8964
B1	9216
B2	8748
C1	8928
C2	9072

Pour valider le présent modèle, deux comparaisons sont effectuées avec des données expérimentales et numériques disponibles dans la littérature. Premièrement, la température moyenne prédite est comparée aux résultats expérimentaux de Mat et al. [79] pour le processus de fusion de la paraffine RT82 (plage de température de fusion 77-85 °C). La fusion se produit dans un échangeur de chaleur à tube triplex avec des ailettes fixées au tube intérieur (4 ailettes) et le tube extérieur (4 ailettes) contenant le MCP. La température moyenne initiale du MCP était de 27 °C tandis que la température du fluide caloporteur (eau) était maintenue constante à 90 °C. La comparaison est illustrée sur la fig. 2.16, comme on peut le voir, un accord raisonnable est obtenu. Cependant, la température moyenne surestimée au début du processus de fusion peut

être attribuée aux hypothèses faites dans le modèle numérique actuel, principalement les propriétés thermophysiques supposées constantes.

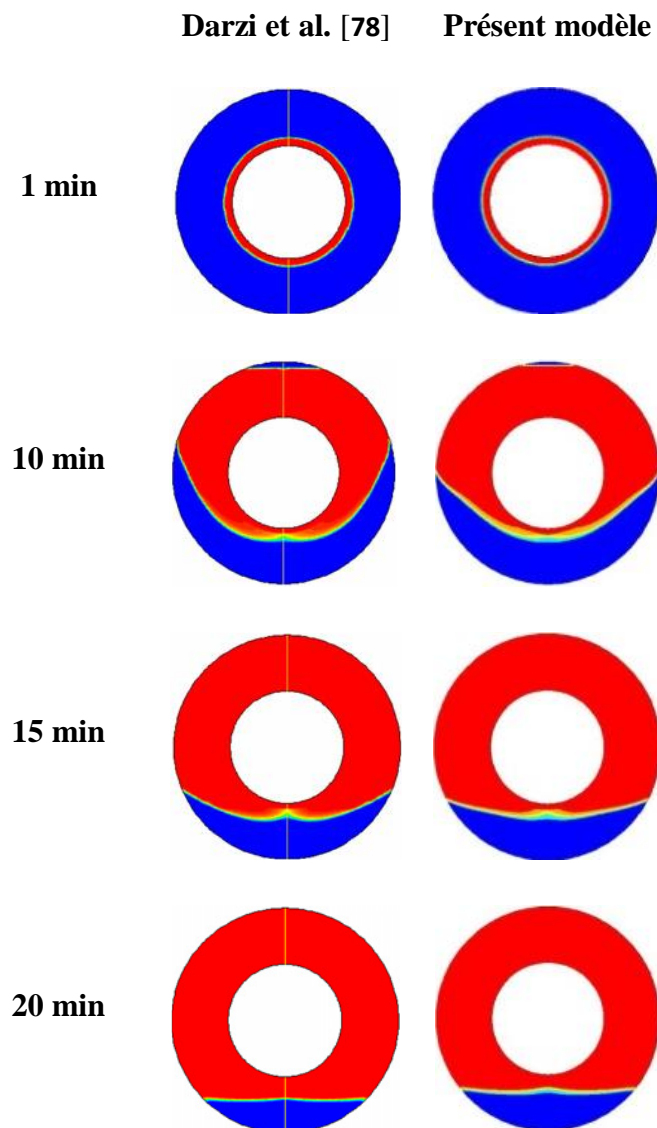


**Figure 2.16 :** Comparaison des prédictions numériques avec des données expérimentales



**Figure 2.17 :** Comparaison des prédictions numériques avec les résultats numériques

De plus, les prédictions numériques de la fraction liquide et du front de fusion sont comparés aux résultats numériques de Darzi et al. [78]. Les auteurs ont étudié le processus de fusion du n-eicosane enfermé entre deux tubes concentriques. Le MCP était initialement solide à 308,151 K. Le tube interne a été maintenu à température chaude (329,15 K) tandis que le tube externe était isolé. La conductivité thermique du tube intérieur est de 400 W/(m K). Les résultats de la comparaison de la fraction liquide et le front de fusion par rapport à cette étude sont montrés sur les figs. 2.17 et 2.18. Un très bon accord est obtenu, comme on peut le voir. Cette concordance peut s'expliquer par la même méthode de modélisation numérique utilisée dans les deux travaux.



**Figure 2.18** : Comparaison des prédictions numériques du front de fusion

## **2.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons modélisé le phénomène du changement de phase à l'aide du code de calcul Ansys Fluent qui utilise l'approche enthalpie-porosité dans laquelle la zone pâteuse est considérée comme un milieu poreux où la fraction liquide est sa porosité.

Les prédictions du modèle numérique de changement de phase ont été validées par comparaison avec les résultats numériques et expérimentaux.

## Chapitre 3

### **Etude de la fusion dans une conduite cylindrique annulaire horizontale équipée de deux ailettes**

## Chapitre 3

### Etude de la fusion dans une conduite cylindrique annulaire horizontale équipée de deux ailettes

#### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre on va étudier l'effet des orientations des ailettes d'un échangeur de chaleur horizontal à tube annulaire à deux ailettes sur l'amélioration du transfert de chaleur pendant le processus de fusion du n-eicosane, en tant que matériau à changement de phase utilisé dans les systèmes de stockage thermique. L'impact de l'orientation des ailettes sur la vitesse de fusion, la conduction thermique et la convection naturelle est discuté. Les résultats numériques sont illustrés par le front de fusion, lignes de courant et les isothermes, densité de flux de chaleur (HF) et le coefficient de transfert de chaleur (HTC).

#### 3.2. Description du système

Dans le but d'étudier l'amélioration thermique et l'effet de l'orientation des ailettes sur le processus de fusion, trois cas ont été étudiés (fig 3.1) : une conduite de base sans ailettes (cas A), une conduite équipé de deux ailettes horizontales (cas A1) et une autre équipée avec deux ailettes verticales (cas A2).

Les détails du modèle physique sont dans la section 2.2.1.

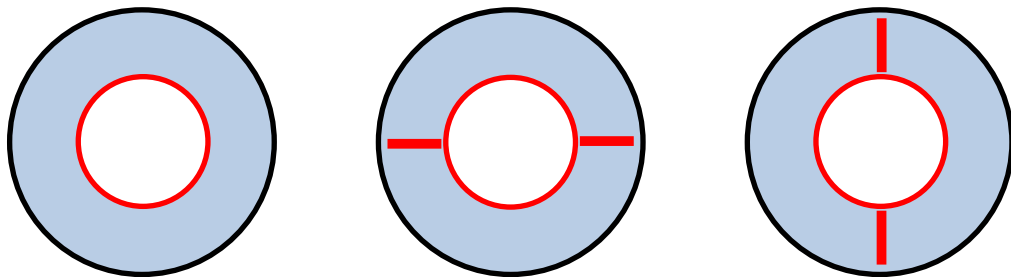


Figure 3.1. Représentation schématique des cas étudiés

### 3.3. Résultats et discussions

La présente étude analyse le phénomène de la fusion du n-eicosane dans une conduite annulaire soumise aux conditions thermiques définies dans la section 2.2.1. Les résultats numériques sont enregistrés à plusieurs instants sélectionnés durant tout le cycle de fusion.

Ces résultats sont illustrés sous forme d'isothermes, lignes de courant et front de fusion, avec des graphes qui présentent la variation de la densité de flux thermique et le coefficient de transfert thermique, la fraction liquide et la température moyenne du MCP durant tout le processus de fusion.

#### 3.3.1. Cas d'un échangeur sans ailettes

La figure 3.2 présente les contours de la fraction liquide (a), les lignes de courant (b) et les isothermes (c) pour différents instants (0,5, 1, 2, 5, 7, 10, 15 et 30 min). Dans la première étape du système, le MCP est à l'état solide et la fraction liquide est nulle, sa température est inférieure à la température de changement de phase. En ce moment le MCP absorbe la chaleur de la surface du tube intérieur, sa température s'élève progressivement en utilisant l'énergie thermique sensible. Lorsque la température du matériau à changement de phase devient égale à la température de fusion, le processus de fusion démarre et le MCP solide absorbe la chaleur latente tout en changeant de phase solide-liquide dans une petite plage de température et il commence à fondre.

Selon la figure 3.2, après 1 minute de fusion, la forme du front de fusion est presque circulaire. Cela est dû au fait que le transfert de chaleur s'est produit entre la paroi chaude du tube intérieur et le MCP froid par conduction thermique qui domine le processus de fusion au début. Ce dernier provoque la formation d'une fine couche de liquide dans une zone de fusion étroite avec une variation uniforme dans les contours de température et les lignes de courant.

Cependant, après un moment de 2 min, Le front de fusion montre l'apparition de légères ondulations au niveau de la partie supérieure du tube intérieur. Après 5min, l'interface solide-liquide s'est dilatée par rapport au temps et les fronts de fusion sont dominés par les courants de flottabilité qui influencent les régions fondues du MCP fig. 3.3. Par conséquent, la force de flottabilité entraîne la circulation dans le MCP fondu Figure 3.2 (b) avec une variation non uniforme dans les contours de température.

Les différences de densité due au gradient de température poussent le MCP fondu de faire un mouvement rotatif; le fluide moins dense (MCP chaud) monte vers le haut et le fluide plus dense (MCP froid) descend, formant des cellules fig. 3.3.

Ensuite, les cellules de la convection deviennent plus importantes à mesure que le volume de la fraction liquide augmente, la moitié supérieure était plus grande que la moitié inférieure. De toute évidence, la convection naturelle a énormément affecté la moitié supérieure du MCP en raison du mouvement ascendant, tandis que la moitié inférieure reste solidifiée.

Une fois que la moitié supérieure est complètement fondue, le MCP solide commence à se stratifier dans la partie inférieure du tube. La température du liquide près de l'interface liquide-solide est relativement inférieure à celle au-dessus du tube, ce qui réduit encore la vitesse de fusion. Les contours du front de fusion et de la température montrent une variation uniforme, ce qui implique l'absence de l'effet convectif et le retour du transfert conductif. Cette variation engendre un temps de fusion plus long et une stratification de la phase solide.

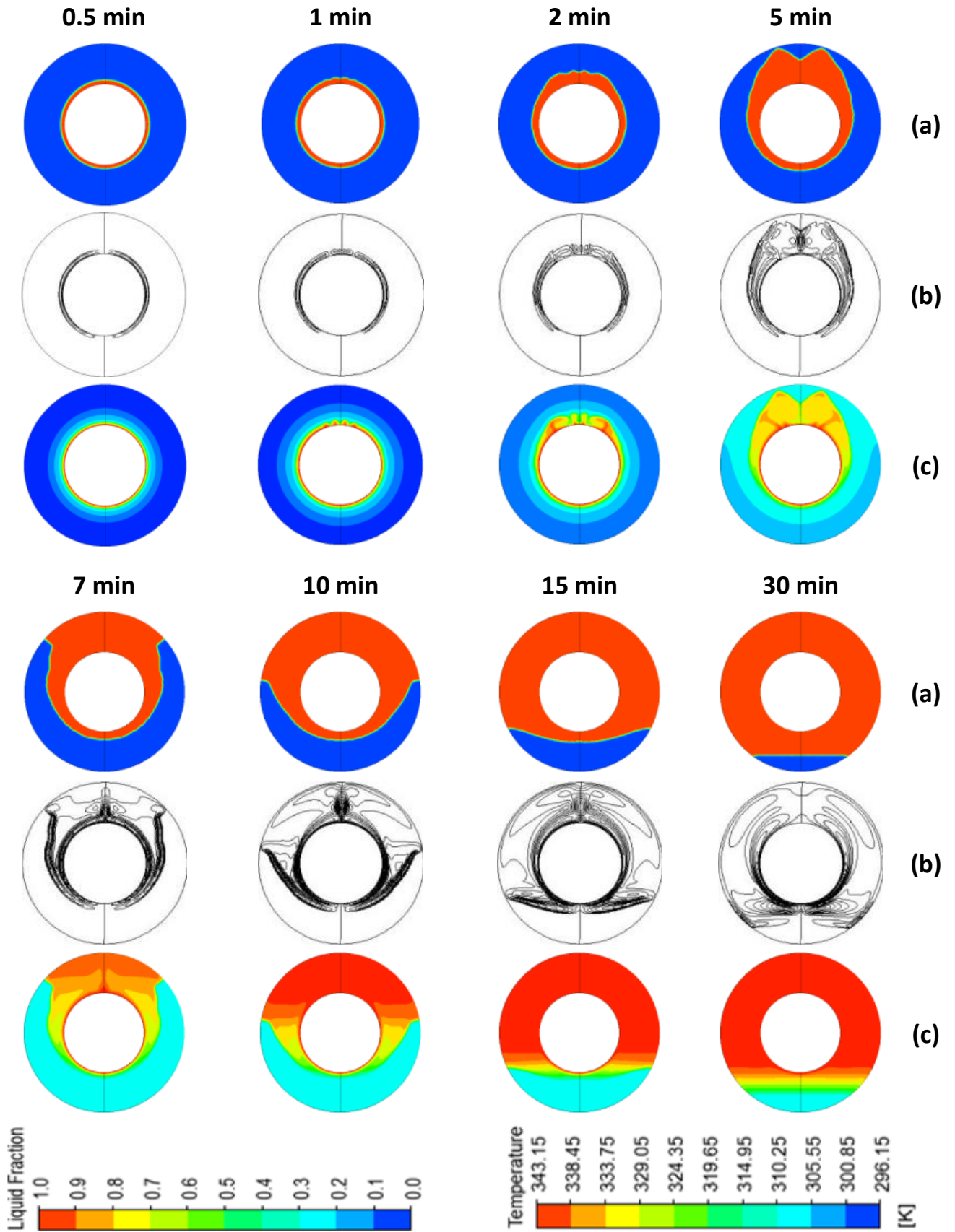
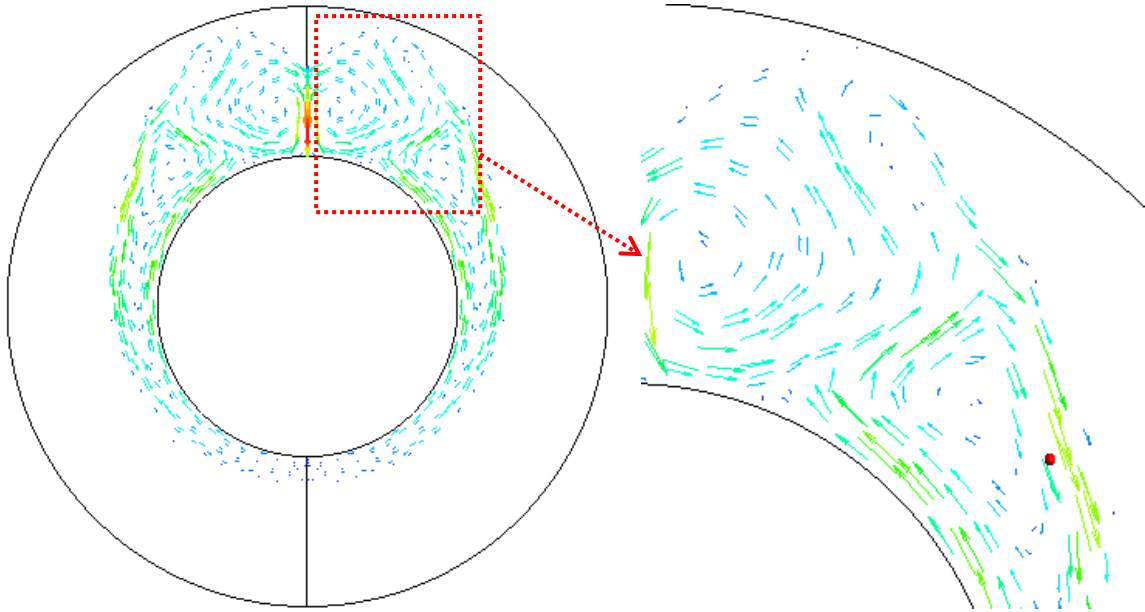


Figure 3.2. Front de fusion (a), lignes de courants (b), et isothermes (c) pour un échangeur sans ailettes



**Figure 3.3.** Mouvement ascendant du MCP fondu pour un échangeur sans ailettes (5min)

L'historique de la fraction liquide et la température moyenne du MCP pour la fusion complète sont illustrés dans les figures 3.4 et 3.5. Durant la période où la moitié supérieure est affectée par le mouvement ascendant du MCP fondu en raison des forces de flottabilité, on observe une forte variation dans la fraction liquide et de la température. Alors le mouvement du MCP fondu dû aux forces de flottabilité accélère le phénomène de fusion. Cependant, comme le MCP dans la partie supérieure de l'annulaire est entièrement fondu, la recirculation dans le système horizontal s'affaiblit en raison de la décroissance du gradient de température dans le MCP liquide. Par conséquent, le MCP solide commence à se stratifier dans la région inférieure et la force de flottabilité dans le système horizontal diminue. Cela provoque un ralentissement dans la variation de la fraction liquide et la température. L'ensemble du domaine MCP est fondu après 48 minutes.

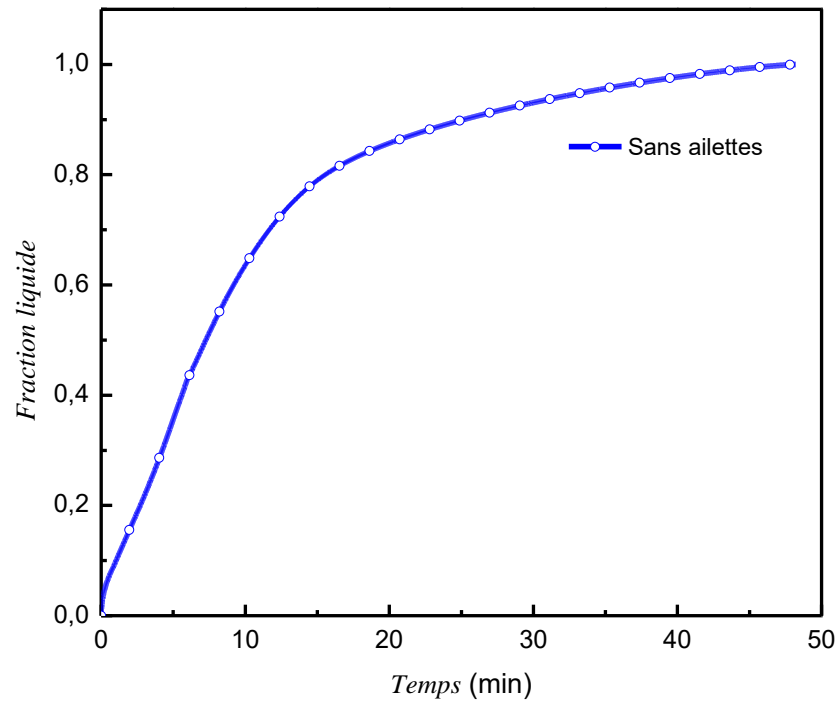


Figure 3.4. Fraction liquide en fonction du temps

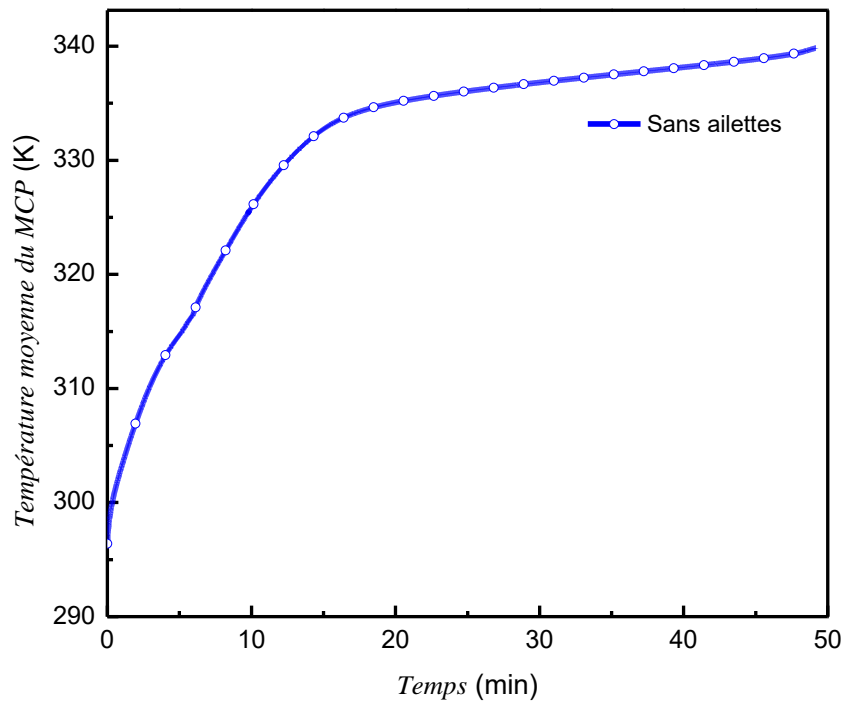


Figure 3.5. Température moyenne en fonction du temps

### 3.3.2. Cas d'un échangeur avec deux ailettes horizontales

L'application d'ailettes intégrées dans les MCPs est la base de la plupart des techniques d'amélioration de la chaleur en raison de sa simplicité, de sa fabrication facile et de son faible coût de construction [98]. Alors, la manière la plus efficace pour montrer l'effet de l'emplacement des ailettes sur l'évolution de la fusion du MCP est de faire tourner l'échangeur de chaleur à tube annulaire.

La figure 3.6 représente l'évolution temporelle du front de fusion (a), des lignes de courants (b), et des isothermes (c) à plusieurs moments choisis (0,5, 1, 2, 5, 7, 10, 15 et 30 min) pour le cas des ailettes horizontales.

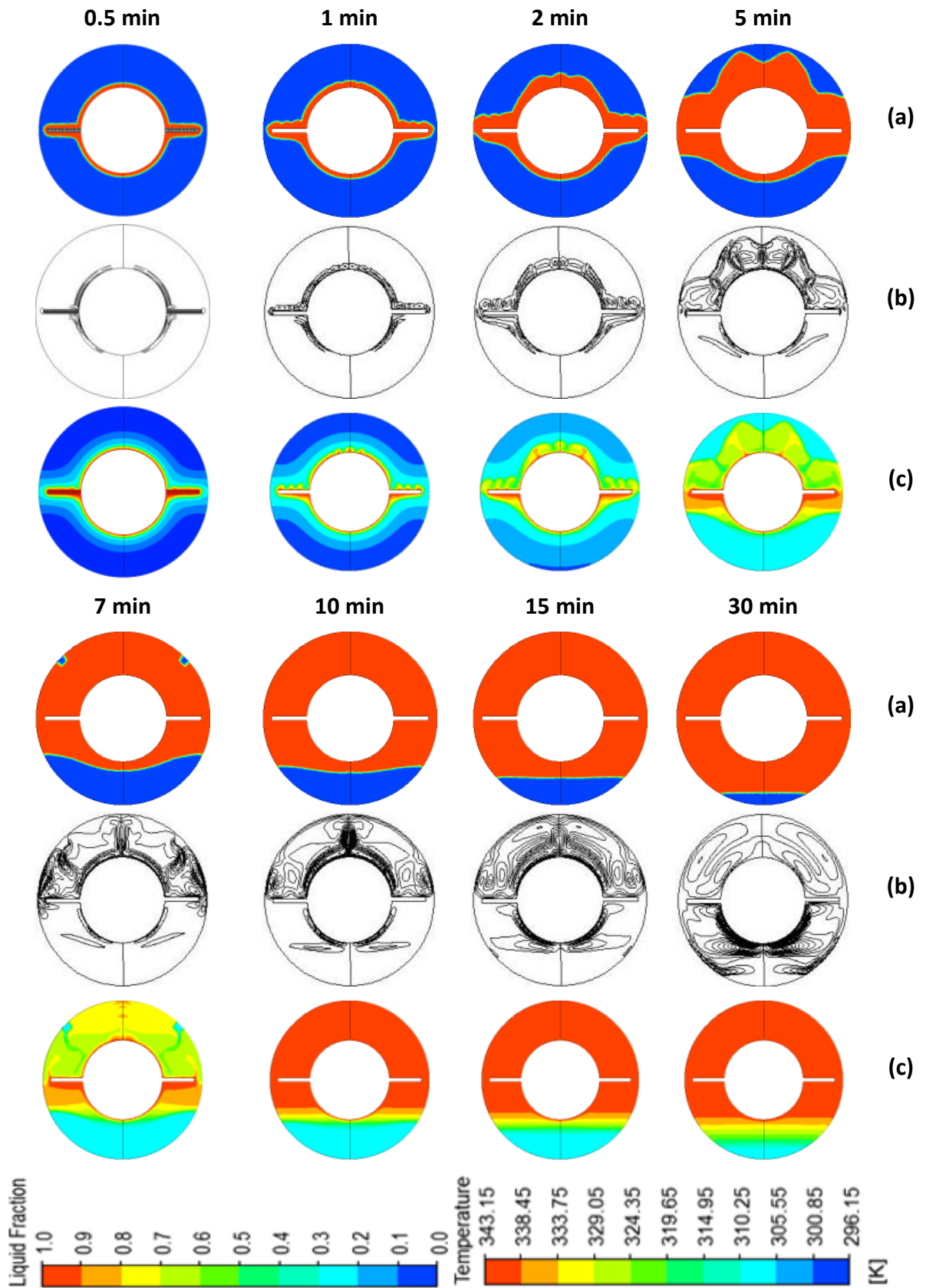
Après un premier temps de  $t = 30$  s, le MCP fondu occupe un espace étroit parallèle à la forme de la surface active fig. 3.6(a). Les lignes de courant prennent une forme uniforme. Les isothermes montrent des températures élevées dans les zones proches d'ailettes et du tube intérieur et elle diminue quand on s'éloigne de la surface chaude. En ce moment le transfert conductif est le mode dominant car les courants de la convection naturelle ne sont pas encore intensément établis. 30 s plus tard, une formation des petites ondulations dans la partie haute de l'annulaire avec la naissance de petites cellules dans les zones ondulées. Dans cette partie les isothermes montrent une variation non uniforme, cela est clairement illustré dans les contours des lignes de courant fig. 3.6 (b).

Au-delà de 30 s, le processus de fusion s'accélère et les cellules convectives s'élargissent et deviennent plus apparentes. Cette effet est bien illustré dans la partie supérieure, le front de fusion montre une dilatation avec le temps vers le haut jusqu'à où le MCP liquide adhère aux parois latérales du tube extérieur fig. 3.7.

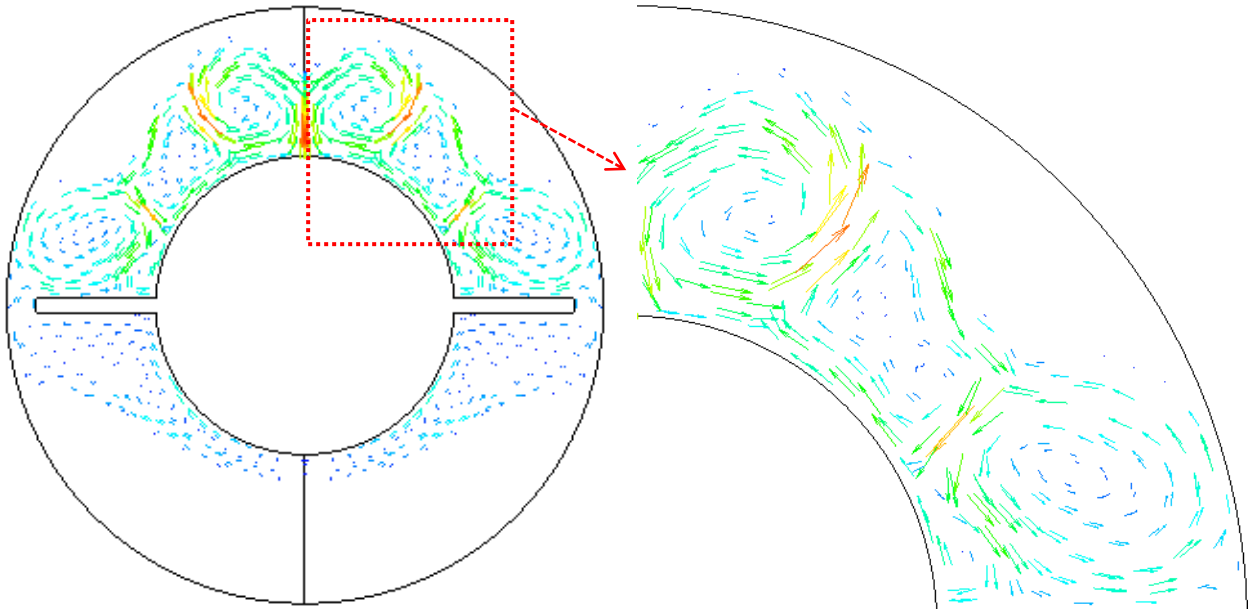
Après 7 min, on remarque que deux petits endroits MCP à l'état solide adhèrent à la paroi intérieure du cylindre extérieur en raison de l'hypothèse d'une fusion contrainte (constrained melting) qui signifie que le MCP solide est immobile. Quand le temps passe la partie supérieure devient complètement en état liquide tandis que la partie inférieure reste encore à la phase solide. Les ailettes dans ce cas perturbent considérablement l'écoulement du liquide. Cela conduit à des circulations irrégulières qui résistent à la convection naturelle pendant le processus de charge. Durant la dernière période du processus, la phase solide montre une variation remarquable dans l'évolution du processus où les isothermes deviennent uniforme, la partie haute atteint l'état d'équilibre et le transfert conductif devient dominant. Ce qui conduit à une fusion uniforme et lente de la phase solide restante.

La partie supérieure montre un transfert thermique plus intense présenté par une grande partie du MCP fusionné par rapport à la partie inférieure : fusion plus développée avec un gradient de température plus élevé due à l'influence du transfert de chaleur par convection naturelle qui joue un rôle important dans cette zone.

La fusion complète est difficile à réaliser dans la région inférieure du tube annulaire car les ailettes bloquent le mouvement du liquide vers la section supérieure et résistent donc à la convection naturelle qui se produit pendant le processus de charge fig. 3.7.



**Figure 3.6.** Front de fusion (a), lignes de courants (b), et isothermes (c) pour le cas d'un échangeur avec deux ailettes horizontales



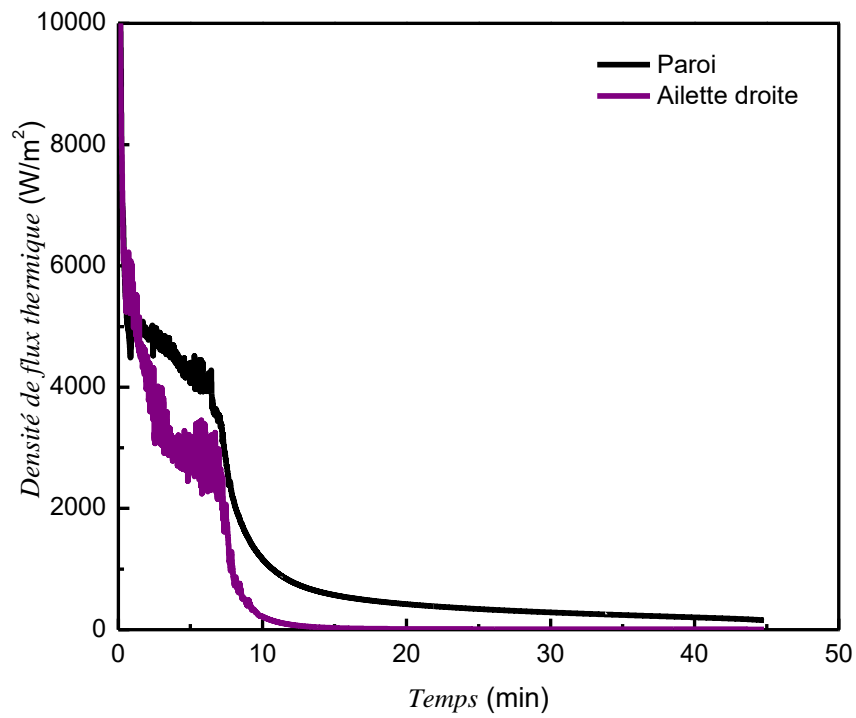
**Figure 3.7.** Mouvement ascendant du MCP fondu pour un échangeur avec deux ailettes horizontales (5min)

La façon la plus pratique d'étudier le comportement thermique et de montrer la capacité globale de transfert de chaleur des parois durant la fusion dans les systèmes de stockage d'énergie thermique à chaleur latente consiste à calculer la densité de flux de chaleur moyenne à la paroi active et à identifier la puissance chargée. Différents travaux expérimentaux et numériques [68, 99-101] ont présenté la densité du flux de chaleur et ont montré son caractère fluctuant avec un pic au temps initial. Il est à noter que les résultats prédits actuels pour la variation de la densité de flux de chaleur avec le temps sont similaires à ces travaux. La densité de flux de chaleur et le coefficient de transfert thermique correspondant sont exprimés par l'expression suivante :  $\varphi_{av} = h_{av}(T_h - T_{av})$  où  $T_h$  est la température de la surface chaude et  $T_{av}$  est la température moyenne du MCP.

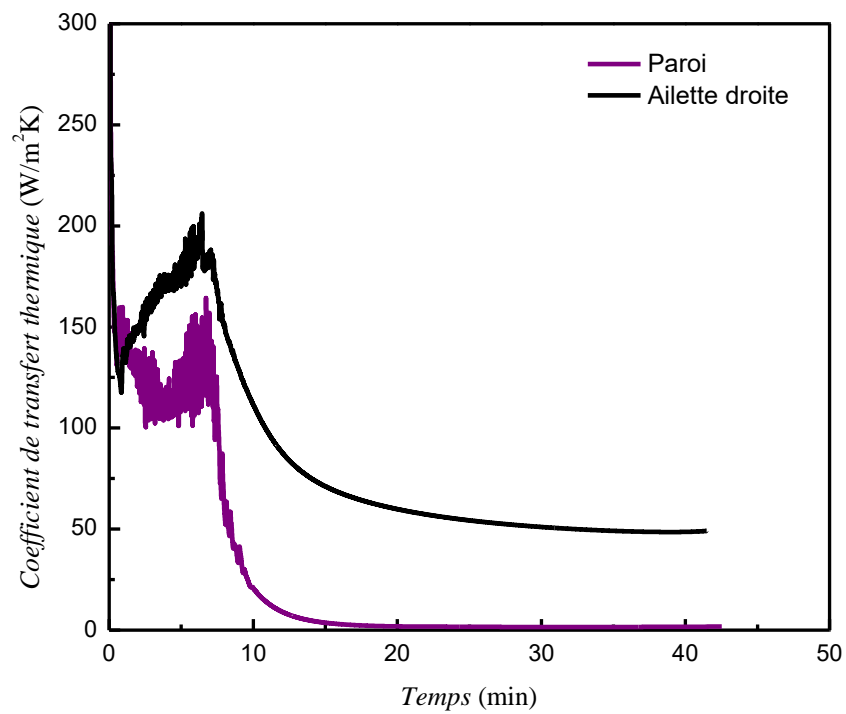
Les figures 3.8 et 3.9 montrent la densité de flux thermique échangé au niveau de la surface du tube intérieur et des ailettes et les coefficients de transfert de chaleur correspondants déduits pour le cas de la configuration d'ailettes horizontales.

Le phénomène étant symétrique, les mêmes résultats sont enregistrés pour les ailettes à droite et à gauche. Au début, un pic est détecté. Cela est induit par la grande différence de température entre la température chaude de la surface active et le MCP solide. Après ce temps, on remarque une chute rapide pendant la phase initiale dominée par la conduction. Ceci est suivi d'un changement soudain de la pente indiquant que la convection naturelle est établie dans le système. Une valeur presque constante de flux de chaleur est observée au cours de cette étape

concernant les deux surfaces. Durant cette période, le processus de charge se déroule à une vitesse constante. D'après les figures, les valeurs du flux de chaleur et du coefficient de transfert de chaleur pour le tube intérieur sont plus élevées que les valeurs des ailettes.



**Figure 3.8.** Densité de flux de chaleur en fonction du temps pour le cas d'un échangeur avec deux ailettes horizontales



**Figure 3.9.** Coefficient de transfert thermique en fonction du temps pour le cas d'un échangeur avec deux ailettes horizontales

### 3.3.3. Cas d'un échangeur avec deux ailettes verticales

La figure 3.10 représente les contours de la fraction liquide (a), les lignes de courant (b) et les contours de la température (c) du MCP à différents instants (0,5, 1, 2, 5, 7, 10, 15, 30 min) pour le cas des ailettes positionnées verticalement.

Comme il est montré dans la figure 3.10, lors de la période initiale du processus de fusion, le MCP solide absorbe l'énergie thermique du tube intérieur et des ailettes.

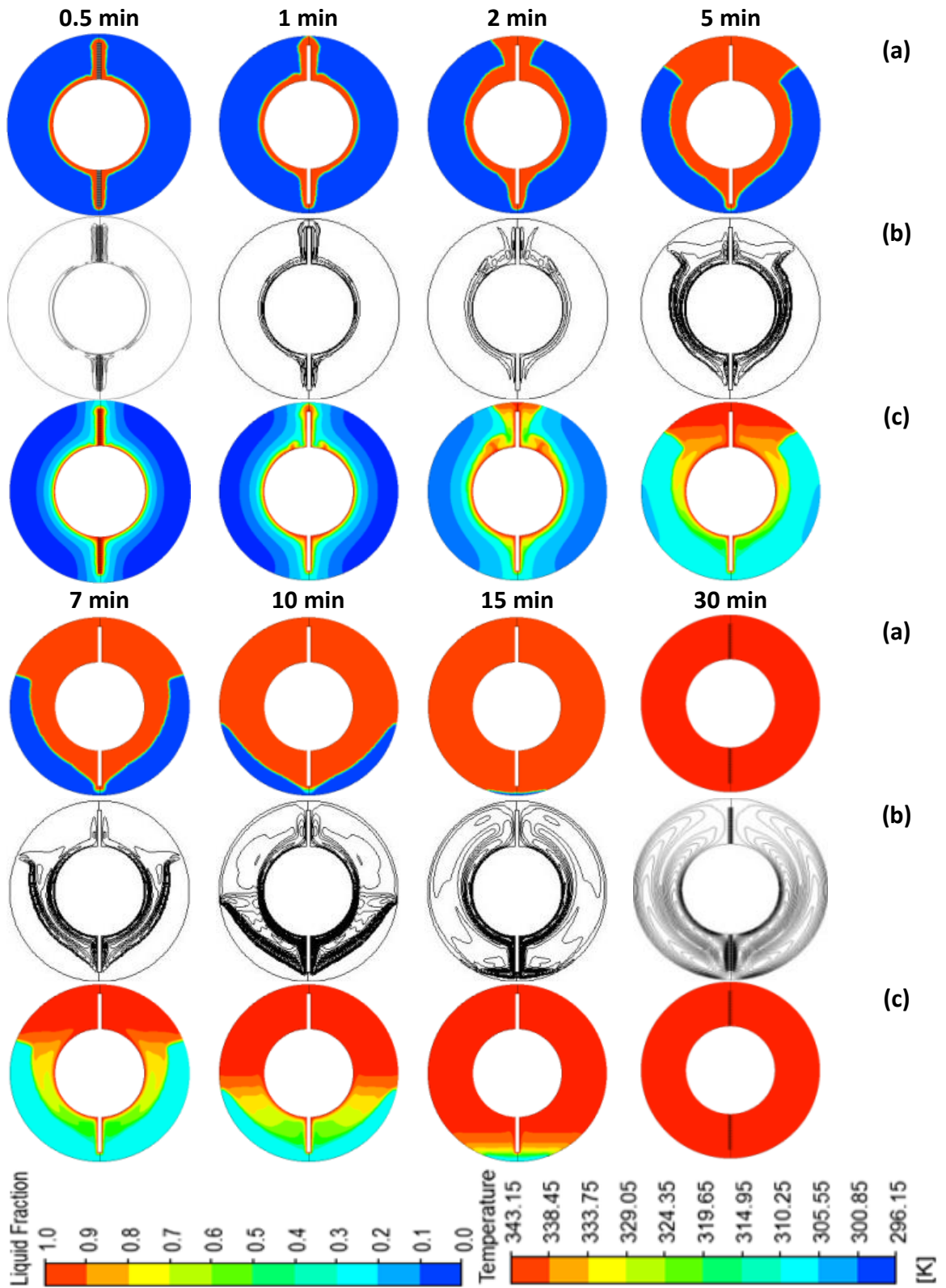
Durant cette période la fusion démarre et se développe progressivement d'une façon parallèle à la surface chaude et de manière symétrique. A ce stade, les isothermes dans le liquide fondu sont presque verticales fig. 3.10 (c) et le transfert de chaleur à travers la conduite se fait principalement par conduction.

Après 2 min le front de fusion change de forme dans la partie supérieure près de l'ailette supérieure, les lignes de courants (b) et les isothermes (c) montrent une variation non uniforme. La différence de densité pousse le liquide chaud à monter vers le haut le long des ailettes et descend le long de l'interface de fusion. Les isothermes dans la partie où le liquide se retrouve dans la partie supérieure entre l'ailette et le cylindre extérieur, montrent des valeurs maximales avec la présence d'un mouvement rotatif de convection naturelle fig. 3.11.

À  $t=7$  min, le MCP liquide remplit progressivement la région supérieure de la conduite. L'ensemble du processus de fusion est actif par le mode de transfert de chaleur par convection. La vitesse de fusion est presque constante pendant tout le processus. Dans ce cas, l'orientation des ailettes joue un rôle important dans la fusion en raison de l'apparition de la convection. Un meilleur transfert de chaleur par convection naturelle est représenté par une fraction liquide plus élevée.

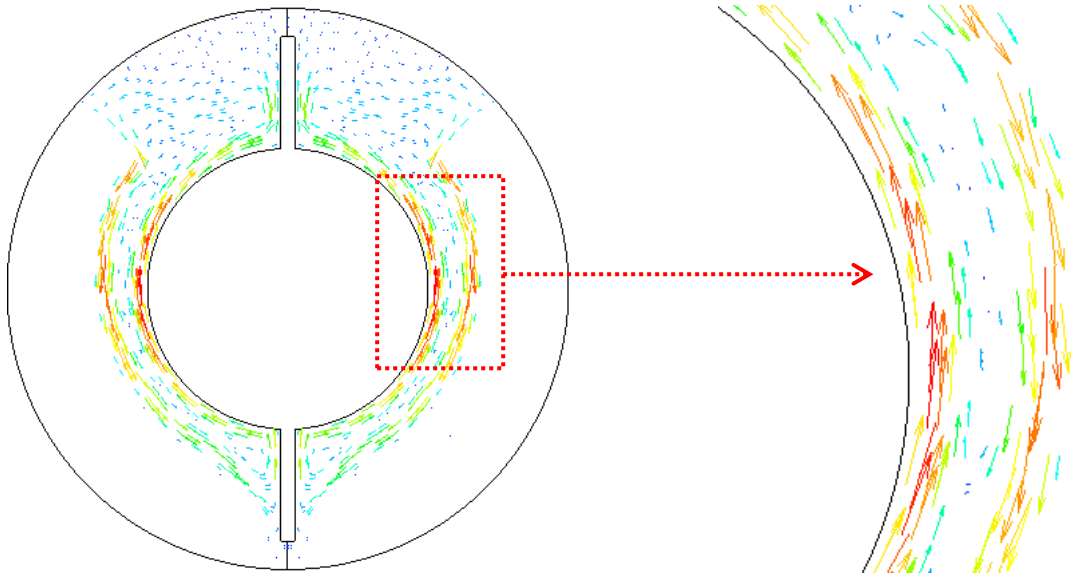
Les figures 3.12 et 3.13 montrent l'évolution de la densité de flux de chaleur et du coefficient de transfert de chaleur du tube intérieur et des ailettes. On peut voir que ces quantités diffèrent entre les surfaces étudiées dans le cas des ailettes verticales. Comme prévu, une fusion plus rapide est due à un échange de flux de chaleur plus élevé.

Au cours de la première phase du processus de fusion, la densité de flux de chaleur est très élevée, en raison de la différence de température élevée entre la température de surface chaude et la température du MCP froid. L'échange de chaleur est assuré principalement par conduction, subit une forte variation décroissante. Cela est suivi d'un changement brusque de la pente et d'un taux de transfert de chaleur assez constant. Ce changement est le résultat de l'action de la convection naturelle dans le système, ce qui induit un échange thermique important durant cette période.



**Figure 3.10.** Front de fusion (a), lignes de courants (b) et isothermes (c) pour le cas d'un échangeur avec deux ailettes verticales

Enfin, le flux de chaleur chute à nouveau au cours du processus de charge. D'après les figures 3.12 et 3.13 un meilleur taux de transfert de chaleur et un meilleur coefficient de transfert de chaleur ont été observés pour l'ailette inférieure.



**Figure 3.11.** Mouvement ascendant du MCP fondu pour un échangeur avec deux ailettes verticales (5min)

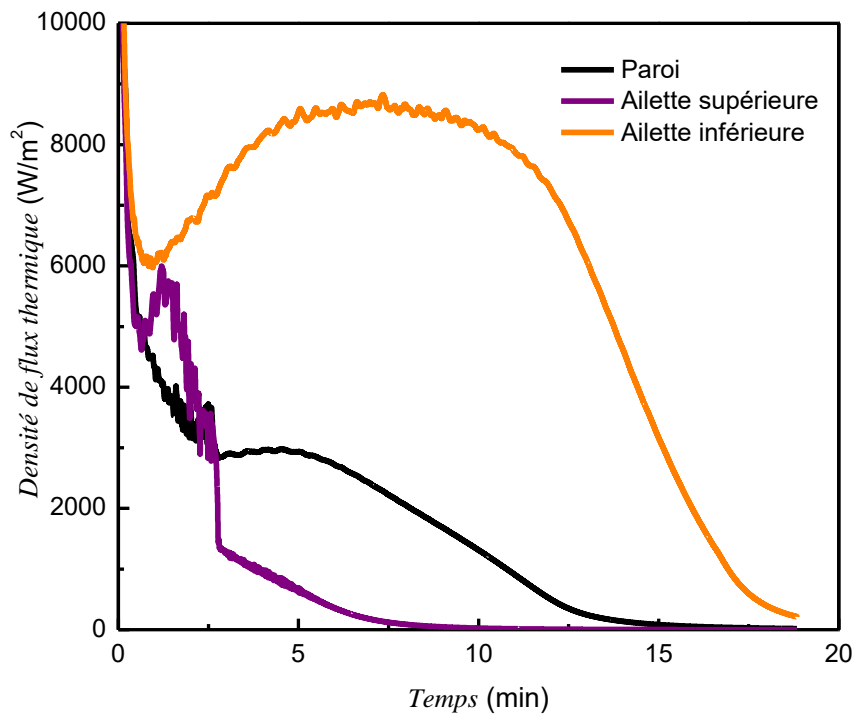


Figure 3.12. Densité de flux de chaleur en fonction du temps pour le cas d'un échangeur avec deux ailettes verticales.

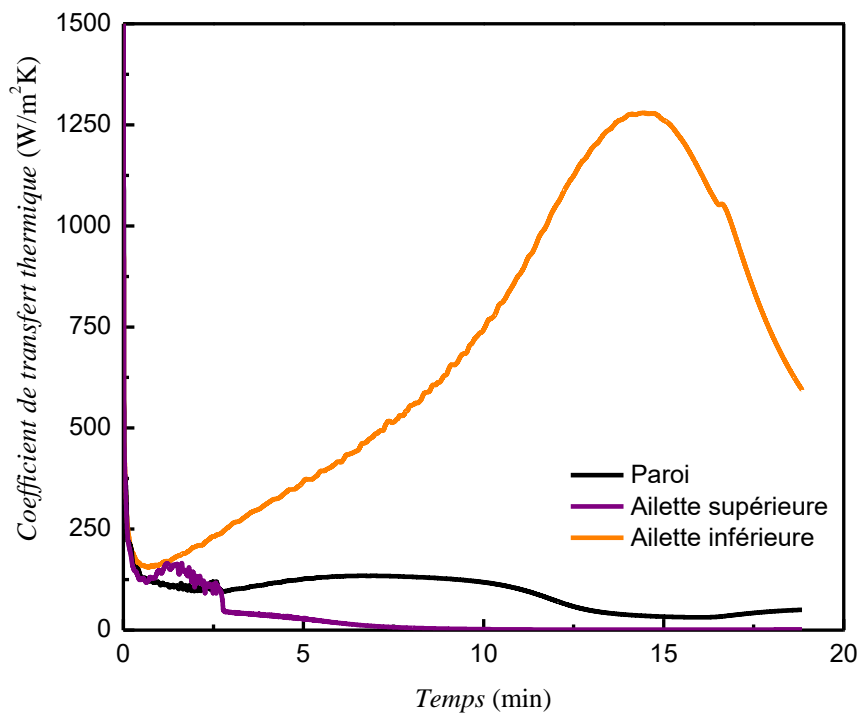


Figure 3.13. Coefficient de transfert thermique en fonction du temps pour le cas d'un échangeur avec deux ailettes verticales.

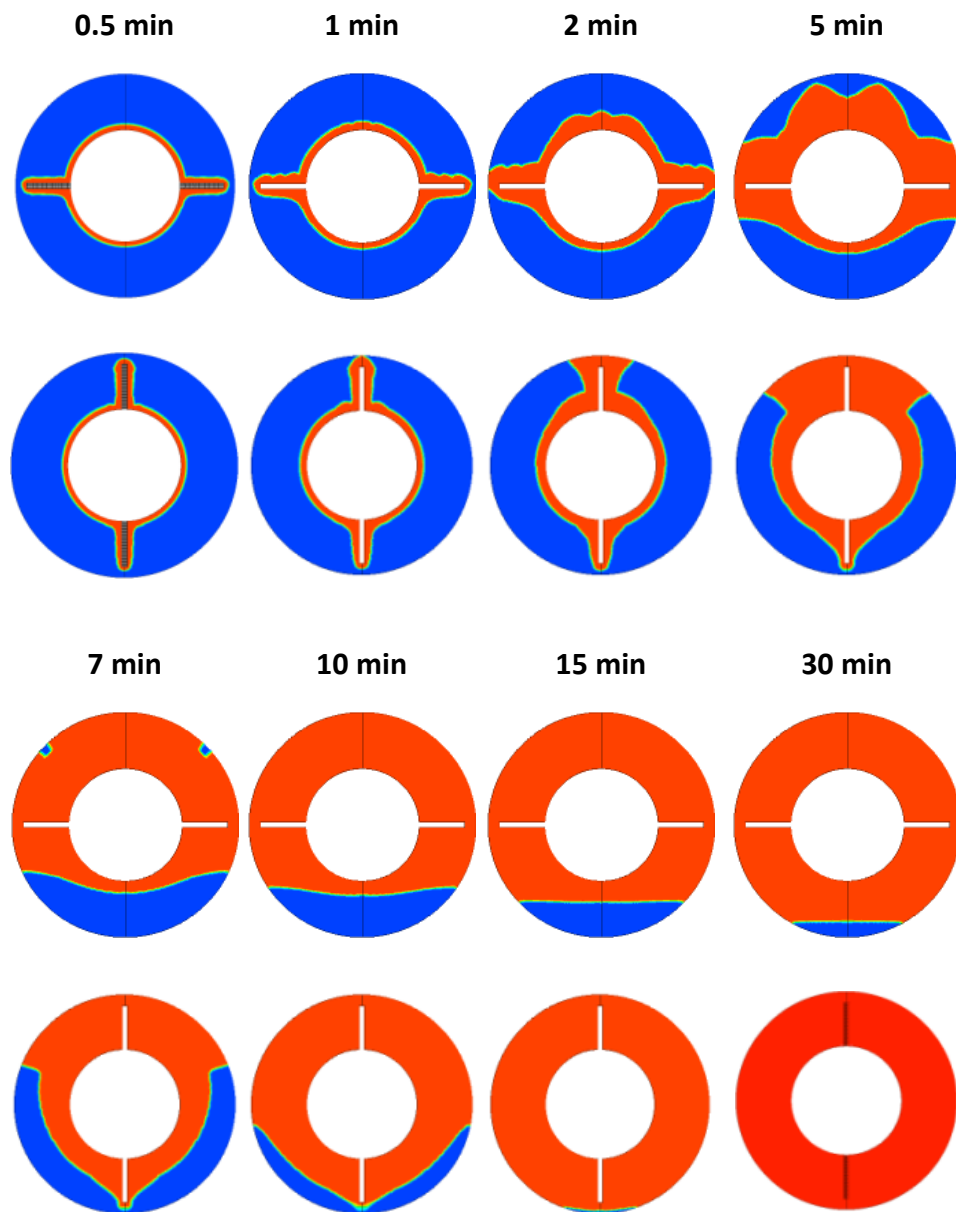
### 3.4. L'effet de l'orientation des ailettes

Les figures 3.14-3.20 montrent l'effet de l'orientation des ailettes sur le front de fusion, la fraction liquide, le temps total de fusion, la température moyenne du MCP et l'énergie stockée au cours d'un processus de fusion pour les cas étudiés.

Les figures montrent clairement que le taux de fusion et le transfert de chaleur sont affectés par l'orientation des ailettes dans la conduite. On constate que les courbes ont un comportement approximativement linéaire pour les deux cas durant l'intervalle de temps (0-7 min) avec des valeurs quasi identiques pour le taux de fusion et l'énergie stockée. Après ce temps, la fusion a ralenti pour le cas des ailettes horizontales car la disposition des ailettes bloque l'écoulement du MCP liquide et résiste à la convection naturelle se produit pendant le processus de charge. Pendant ce temps la disposition verticale permet aux fluides de circuler à travers l'échangeur de chaleur de telle sorte que le liquide chaud se dirige vers le haut et le liquide froid se déplace librement vers la partie inférieure. La fusion complète dans le cas des ailettes verticales se produit à 16 minutes alors que cela prend 42 minutes pour le cas des ailettes horizontales, ce qui montre une différence de 26 minutes.

Cette différence signifie un facteur de réduction de 2,5 du temps de fusion. La conception d'ailettes verticales offre des performances supérieures par rapport à la conception d'ailettes horizontales : une fraction liquide plus élevée, un meilleur transfert de chaleur par convection naturelle confirmé par une évolution de température plus élevée.

La comparaison du taux de transfert de chaleur et du coefficient de transfert de chaleur pour les deux modèles est présentée dans les figures 3.19 et 3.20. Ces figures montrent que le temps de fusion complète du MCP est plus élevé dans le cas des ailettes horizontales que dans le cas des ailettes verticales. Cela peut s'expliquer par l'influence du type de transfert de chaleur dominant sur le processus de fusion. Le transfert de chaleur par convection a une contribution plus élevée à la fusion et aide à augmenter le coefficient de transfert de chaleur et à réduire le temps de fusion complète.



**Figure 3.14.** Comparaison du front de fusion entre les configurations d'ailettes horizontales et verticales

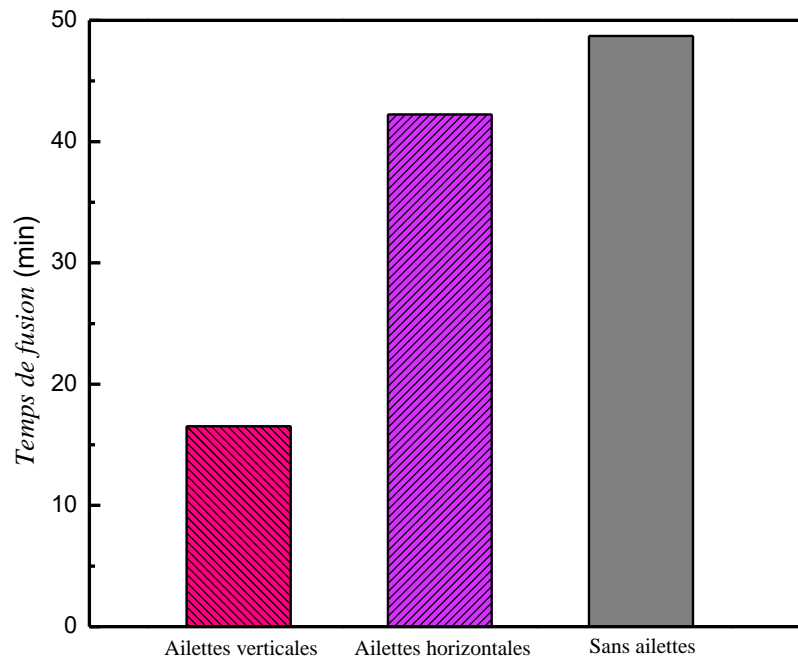


Figure 3.15. Comparaison du temps total de fusion

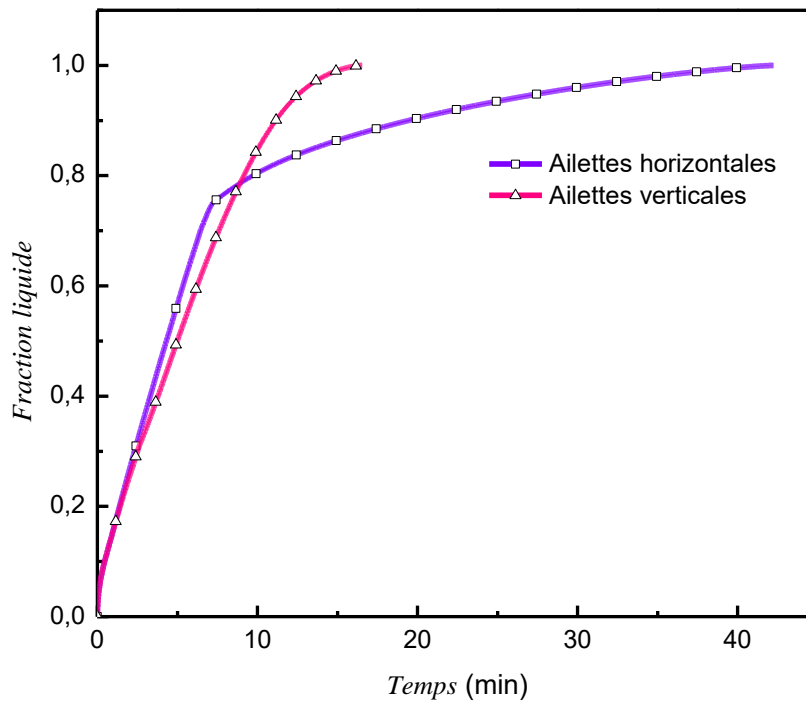


Figure 3.16. Comparaison de la fraction liquide en fonction du temps entre les configurations d'ailettes horizontales et verticales

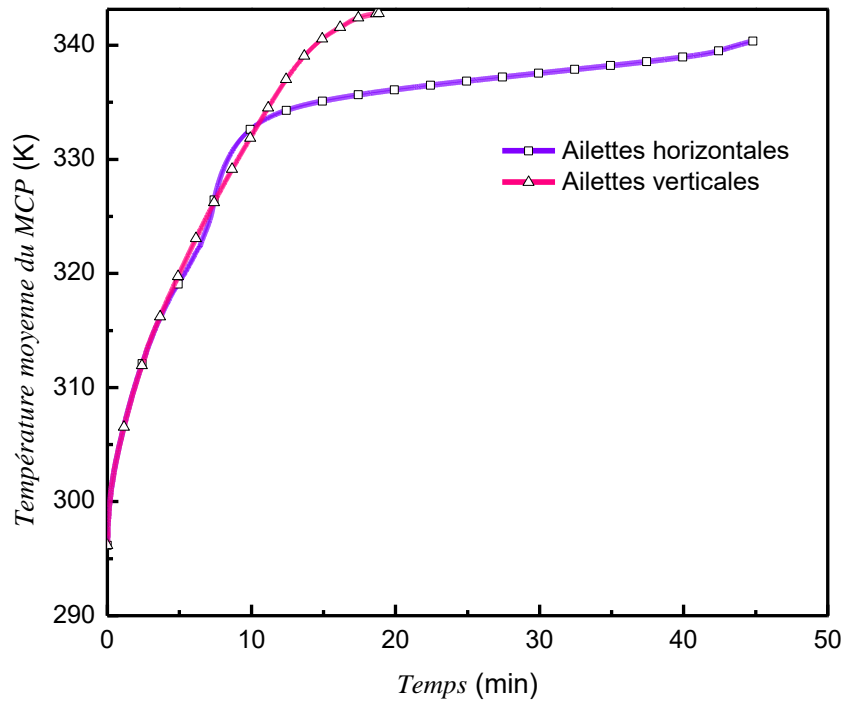


Figure 3.17. Comparaison de la température moyenne en fonction du temps entre les configurations d'ailettes horizontales et verticales

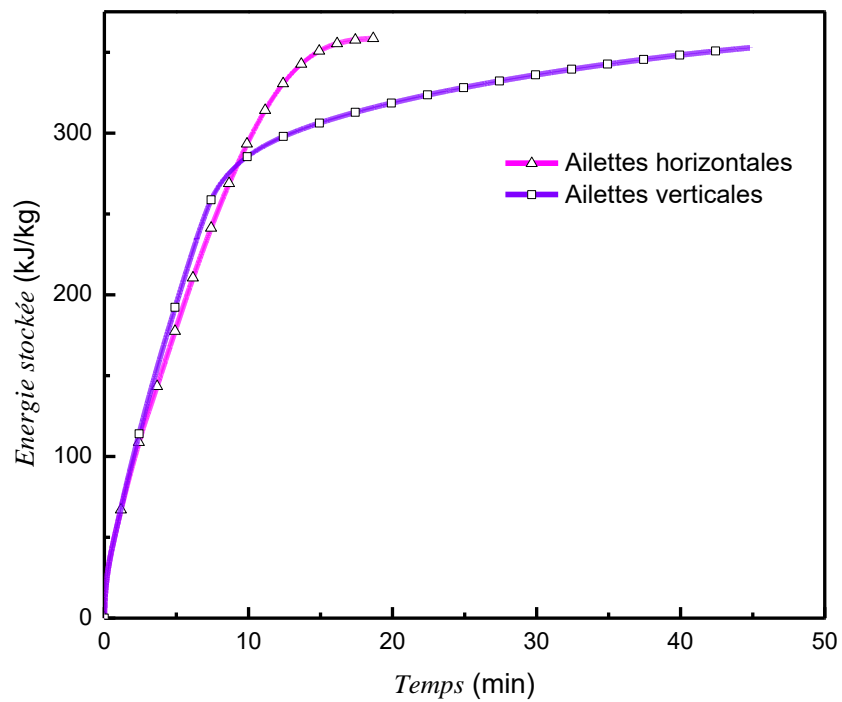
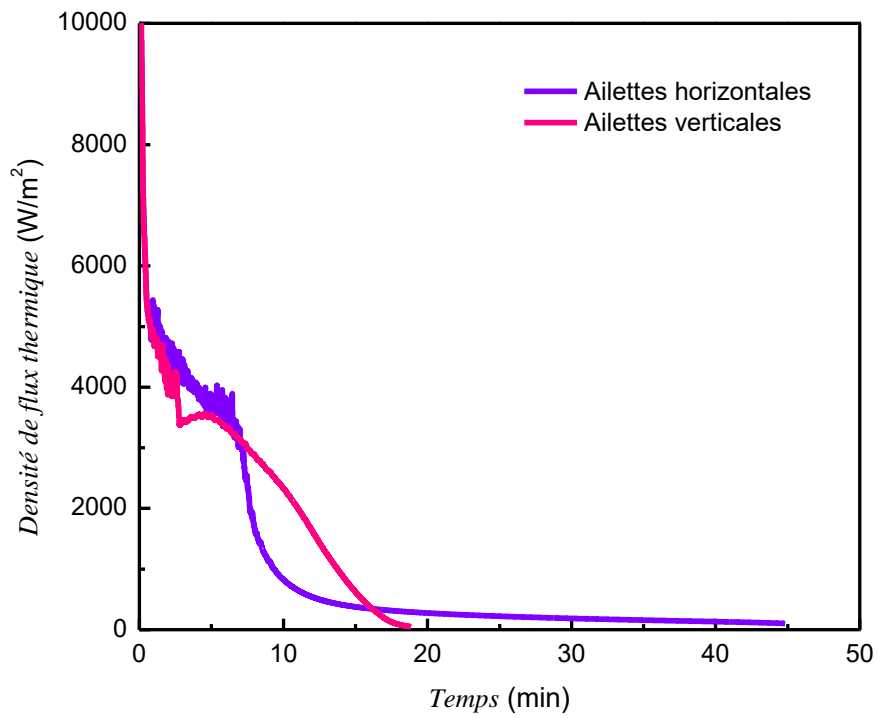
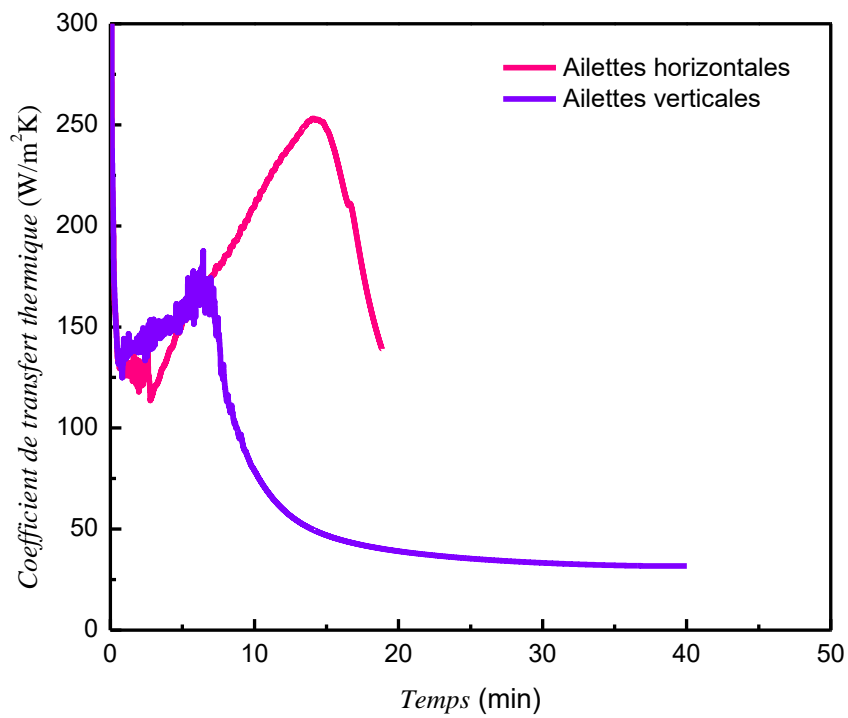


Figure 3.18. Comparaison de l'énergie stockée en fonction du temps entre les configurations d'ailettes horizontales et verticales



**Figure 3.19.** Comparaison des densités de flux de chaleur entre les configurations d'ailettes horizontales et verticales



**Figure 3.20.** Comparaison du coefficient de transfert de chaleur entre les configurations d'ailettes horizontales et verticales

### 3.5. Conclusion

L'amélioration du transfert de chaleur pour un échangeur de chaleur annulaire en utilisant des ailettes pour accélérer la vitesse de fusion du n-eicosane en tant qu'un MCP a été étudiée.

Le modèle prévoit l'effet de l'utilisation des ailettes métalliques pour améliorer le transfert de chaleur et l'effet de leur orientation (cas horizontal et vertical) sur les performances thermiques. Différents paramètres, notamment la température moyenne du MCP, la fraction liquide, la densité de flux de chaleur et le coefficient de transfert de chaleur ont été analysés.

Les résultats numériques du processus de fusion ont montré qu'au premier temps la conduction thermique est le mécanisme de transfert de chaleur le plus dominant. Le comportement thermique à ce stade ne montre aucune différence significative dans les deux cas. Avec l'augmentation de la région fondue, la convection naturelle devient dominante et joue un rôle clé pour le processus de fusion. Le mouvement ascendant du MCP fondu a fortement affecté la moitié supérieure du système. Cela se traduit par une progression de fusion plus rapide à la partie supérieure de l'annulaire par rapport à la partie inférieure. Dans le cas des ailettes horizontales, les ailettes bloquent le déplacement de la chaleur vers la section supérieure et résistent donc à la convection naturelle qui se produit pendant la charge, donc ce modèle n'a pas été utile pour le processus de fusion. Grâce à cette expérience et compte tenu du fait que le MCP solide dans la partie inférieure de l'échangeur de chaleur est la dernière partie qui fond, l'ajout d'ailettes à la région inférieure accélère la fusion et améliore le transfert de chaleur. Des ailettes verticales ont été introduites. Ce modèle a amélioré le temps de fusion. En utilisant une orientation verticale des ailettes, le temps de fusion a été réduit d'un facteur de 2,5 par rapport au cas horizontal.

## Chapitre 4

# **Etude de l'influence de l'orientation des ailettes sur le processus de fusion dans une conduite annulaire horizontale d'un système de stockage thermique**

## Chapitre 4

### **Etude de l'influence de l'orientation des ailettes sur le processus de fusion dans une conduite annulaire horizontale d'un système de stockage thermique**

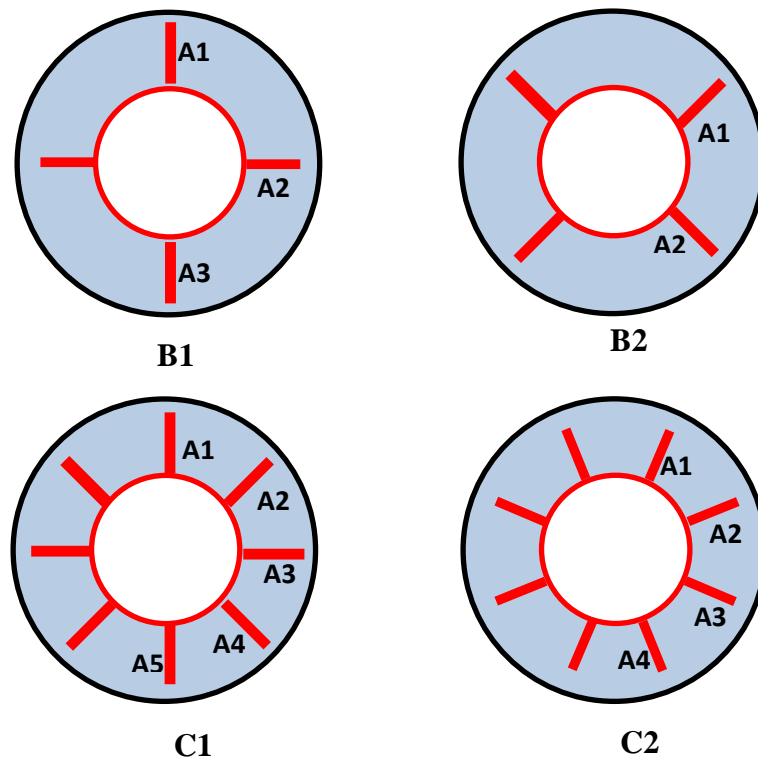
#### **4.1. Introduction**

D'après le chapitre précédent, l'une des méthodes d'amélioration réussies dans le stockage d'énergie thermique par chaleur latente est l'incorporation des ailettes. Dans le présent chapitre on va étudier le processus de fusion à l'intérieur d'un échangeur de chaleur à tube annulaire. Le système a été amélioré et les ailettes ont été placées dans différentes positions avec différents nombres d'ailettes. L'objectif principal de cette section est de montrer l'effet du nombre d'ailettes et leurs orientations sur la performance thermique pendant le processus de fusion. Le deuxième objectif est de montrer l'impact de l'orientation et du nombre d'ailettes sur le mode de transfert de chaleur par convection naturelle, afin d'obtenir la meilleure optimisation thermique pour une disposition optimale avec différents nombres d'ailettes. Le front de fusion, les lignes de courant, les isothermes, ainsi que la fraction liquide, la température moyenne, la densité de flux de chaleur et le coefficient de transfert de chaleur ont été illustrées, comparés et commentés.

#### **4.2. Description du système**

Afin d'étudier l'effet du nombre d'ailettes et de leurs orientation sur les performances du processus de fusion, quatre cas sont étudiés. Les configurations B1 et C1 représentent les cas de 4 et 8 ailettes, respectivement tandis que B2 et C2 sont déduits de B1 et C1 par les rotations d'ailettes par rapport à l'axe vertical de  $\pi/4$  pour B2 et  $\pi/8$  pour C2.

Les détails du modèle physique sont dans la section 2.2.1.



**Figure 4.1.** Représentation schématique des cas étudiés.

### 4.3. Résultats et discussion

En se concentrant sur les effets de l'orientation des ailettes, la présente étude examine les impacts de différents nombres d'ailettes (4 et 8 ailettes) sur le processus de charge thermique du n-eicosane dans un double tube horizontal de stockage d'énergie thermique à chaleur latente. Les résultats obtenus sont présentés en termes de fraction liquide, de lignes de courant, des contours isothermes, de densité de flux de chaleur et de coefficient de transfert de chaleur. De plus, l'influence des différentes orientations des ailettes ( $\pi/4$  et  $/8$ ) sur l'évolution temporelle de la fraction liquide, de la température et du stockage d'énergie ainsi que le temps de fusion total a été discuté.

#### 4.3.1. Cas d'un échangeur de chaleur avec quatre ailettes

La figure 4.2 affiche la fraction liquide, les lignes de courant et les contours de température du MCP aux instants 1, 2, 5, 7 et 10 min, respectivement, pour le cas de quatre ailettes avec deux orientations d'ailettes différentes (Cas b1 et b2). Comme on peut le voir sur la figure, au stade initial du processus de fusion (1 min), un effet insignifiant de la convection libre est observé en raison d'une couche relativement étroite du MCP fondu. Cela signifie que le transfert de chaleur par conduction domine le processus à ce stade.

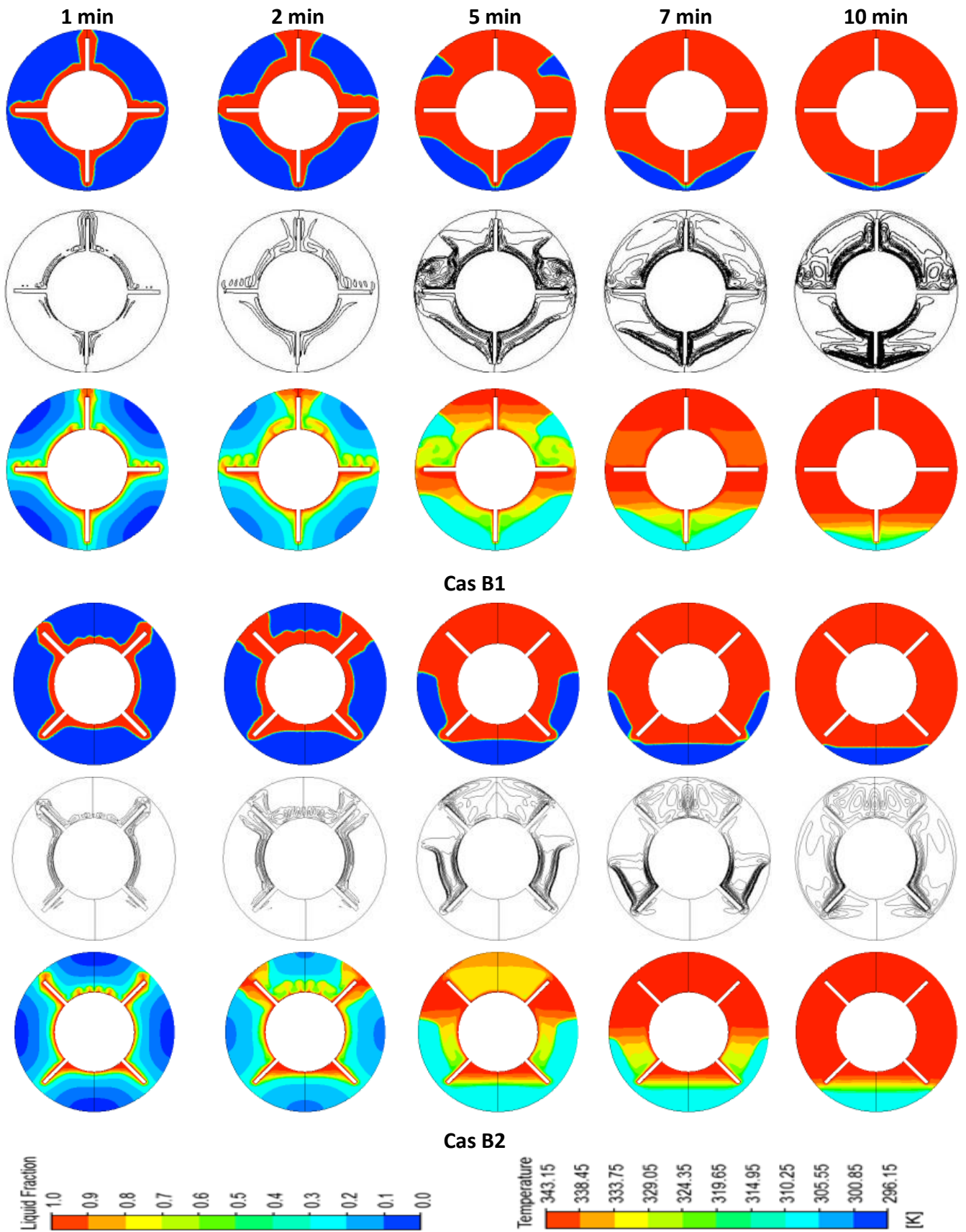
Deux minutes plus tard, le transfert de chaleur par convection libre joue un rôle important en provoquant un mouvement ascendant du MCP liquide chauffé. Plusieurs cellules apparaissent autour des ailettes (F2 et F4) pour la configuration (b1). Le même phénomène se retrouve également dans la partie supérieure du tube annulaire de la configuration (b2) qui s'observe clairement dans les lignes de courants.

Par conséquent, une couche plus épaisse de MCP liquide est formée ; le taux de fusion du MCP pour les deux cas au-dessus du cylindre intérieur est accéléré.

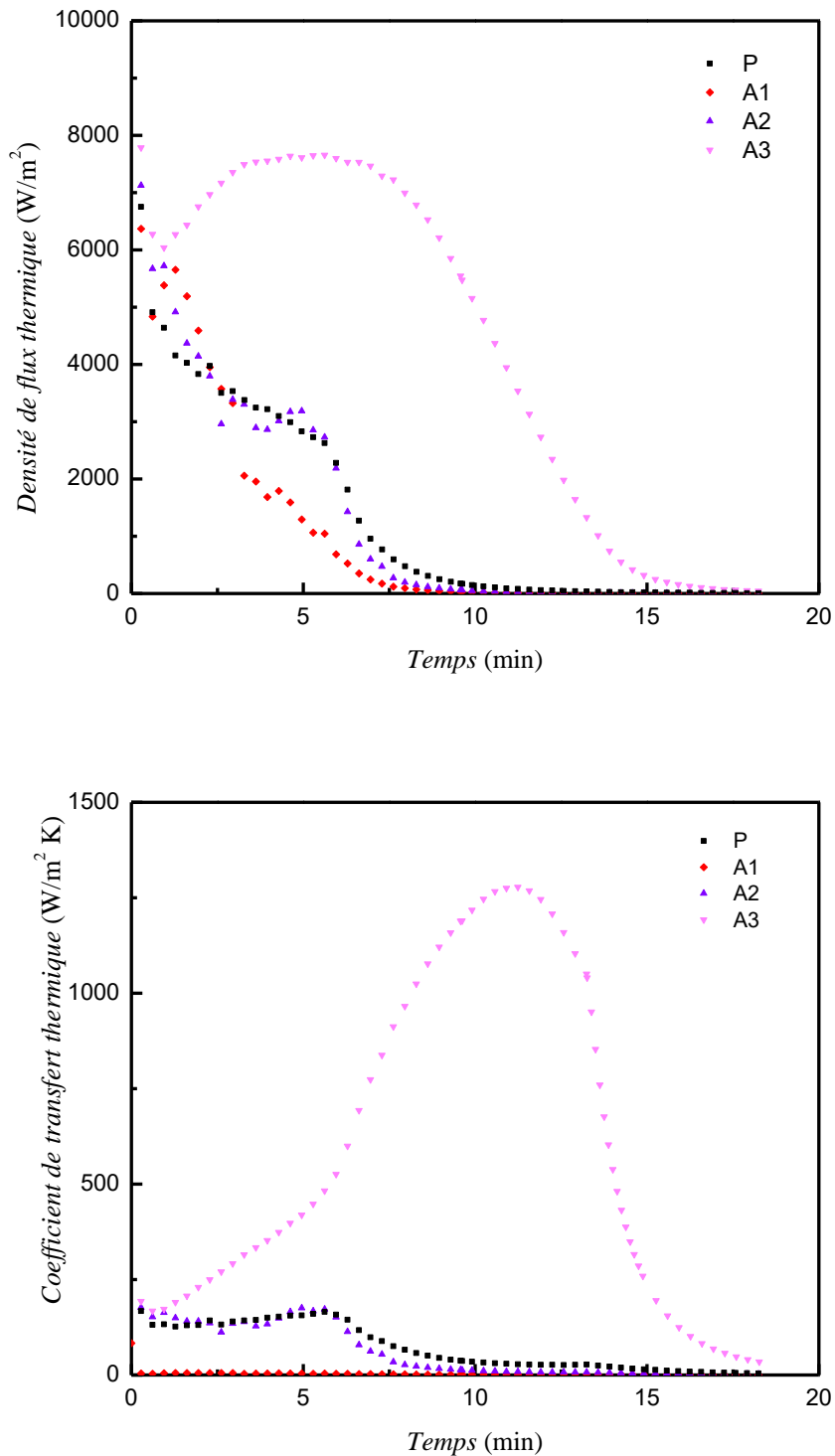
A  $t = 7$  min, le MCP fondu recouvre l'espace supérieur de l'espace annulaire pour le Cas b1, alors que cela se produit à  $t = 5$  min pour le Cas b2. La température devient plus uniforme sur les côtés supérieurs de la conduite dans les deux cas. Cependant, dans la région inférieure (notamment pour le Cas b2), une stratification thermique du MCP est observée ce qui signifie que dans la partie inférieure, le MCP est éloigné des parois chaudes et il est donc difficile de bénéficier de l'effet de la flottabilité. Par ailleurs, La phase solide du MCP reste dans la partie inférieure de l'espace annulaire car sa densité est plus importante que la densité de la phase liquide du MCP. La fusion de la partie solide restante du MCP devient plus difficile car la

convection dans ce cas ne peut pas être dominante, donc, le transfert de chaleur se fait principalement par conduction.

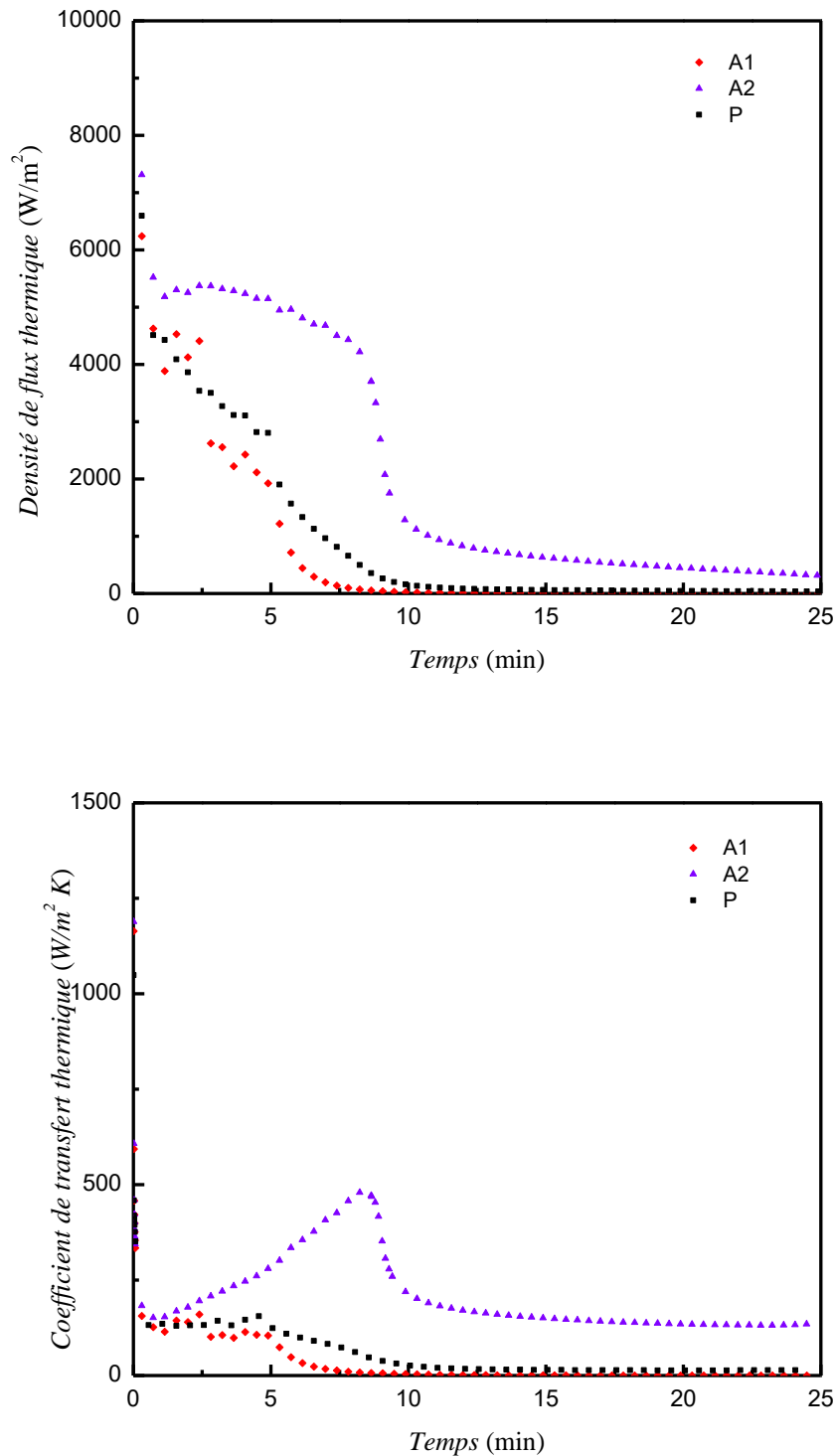
On constate clairement sur les fig. 4.3 et 4.4, les HF et HTC des ailettes inférieures F3 (Cas b1) et F2 (Cas b2) montrent des fluctuations avec un pic important atteignant  $7700 \text{ Wm}^{-2}$  dans le cas b1 et  $5400 \text{ Wm}^{-2}$  dans le cas b2. Pour le coefficient de transfert de chaleur, les valeurs de pic correspondantes sont  $1280 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  et  $490 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Ceux-ci se produisent en raison de fortes circulations convectives. Le MCP fondu est efficacement entraîné par la convection naturelle autour des ailettes, puis cette efficacité diminue à mesure qu'une plus grande partie du MCP fond. Par conséquent, le MCP fondu s'accumule dans la partie supérieure, ce qui entraîne un écoulement de fluide plus restreint et une circulation plus faible. Par conséquent, les courbes montrent une tendance descendante vers les dernières étapes du processus. En outre, toutes les autres parois actives présentent un comportement similaire. En comparant les deux cas b1 et b2, les résultats montrent clairement que l'inclinaison de  $45^\circ$  de chaque ailette donne une tendance similaire dans les courbes avec une différence dans les valeurs. Les ailettes du cas b1 affichent des valeurs plus élevées que celles du cas b2.



**Figure 4.2.** Front de fusion (a), lignes de courants (b), et isothermes (c) pour les cas des échangeurs à 4 ailettes



**Figure 4.3.** Densité de flux de chaleur et coefficient de transfert thermique en fonction du temps pour le cas d'un échangeur à 4 ailettes (cas B1)



**Figure 4.4.** Densité de flux de chaleur et coefficient de transfert thermique en fonction du temps pour le cas de 4 ailettes (cas B2)

### **4.3.2. Cas d'un échangeur de chaleur avec huit ailettes**

La figure. 4.5 affiche l'évolution temporelle du front de fusion, des lignes de courant et des champs de température tout au long du processus de fusion (phase de charge thermique) pour deux orientations d'ailettes différentes (cas c1 et cas c2). On observe qu'à la période précoce (1 min), la fusion évolue parallèlement le long des parois chaudes. Au temps  $t = 2$  min, la forme parallèle de l'interface solide-liquide diminue progressivement à mesure que la partie fondue du MCP commence à s'écouler vers le haut sous l'effet des forces de flottabilité, ce qui est clairement visible dans les lignes de courant. Au temps 5 min, une seule petite partie du MCP solide se trouve dans la partie inférieure, cette dernière fond rapidement. Il convient de noter que la température de la conduite est uniformément augmentée pour les deux cas en raison des effets d'ailettes, qui conduisent la chaleur à un taux plus élevé à cause de leur nombre élevé. De plus, les fortes circulations entre les ailettes indiquent une intensification des courants de convection dans ces régions particulières. Ces courants accélèrent la vitesse de fusion. Par ailleurs, la présence d'un nombre élevé d'ailettes dans la région inférieure empêche le MCP solide de rester dans ces régions, contrairement aux cas décrits précédemment.

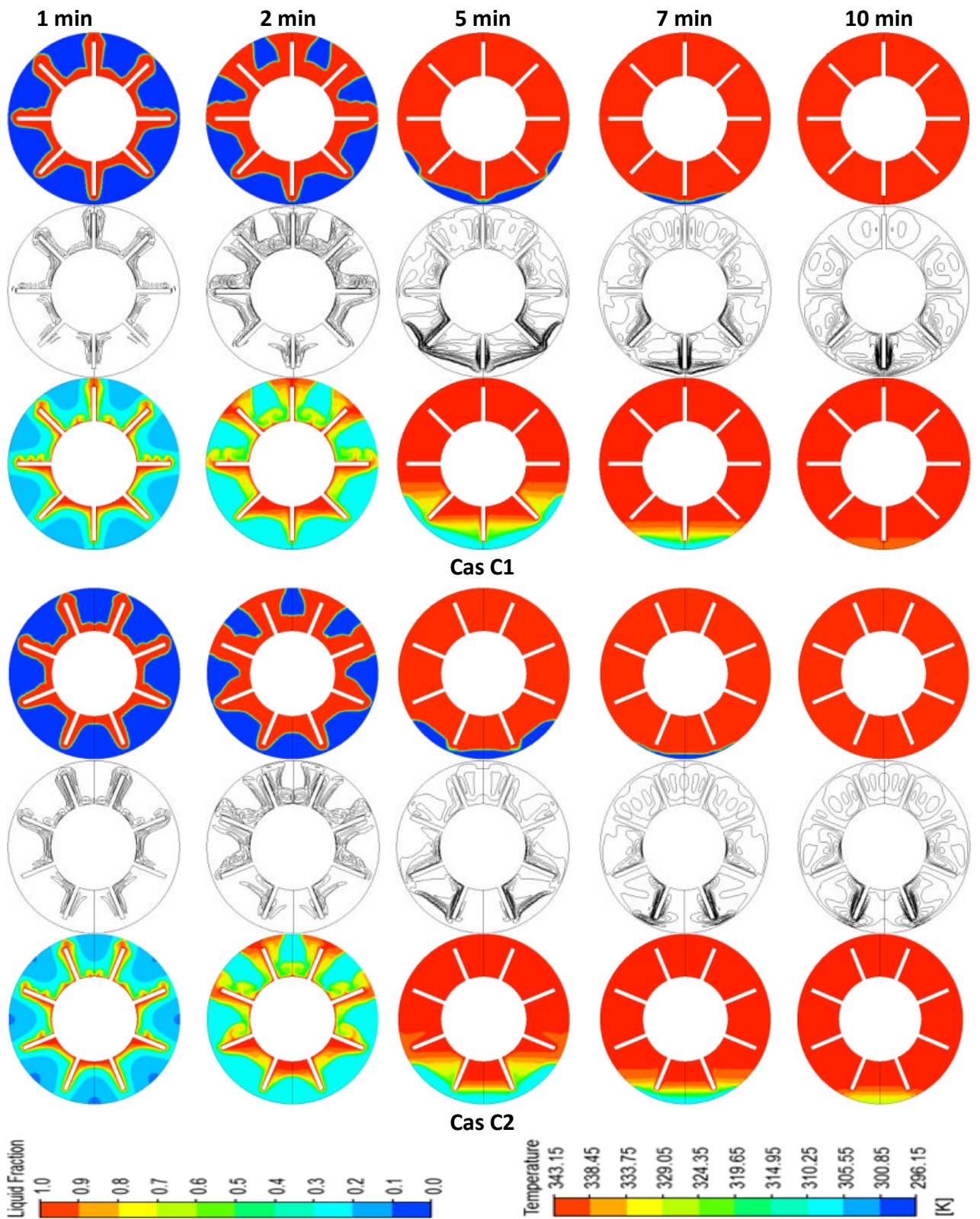
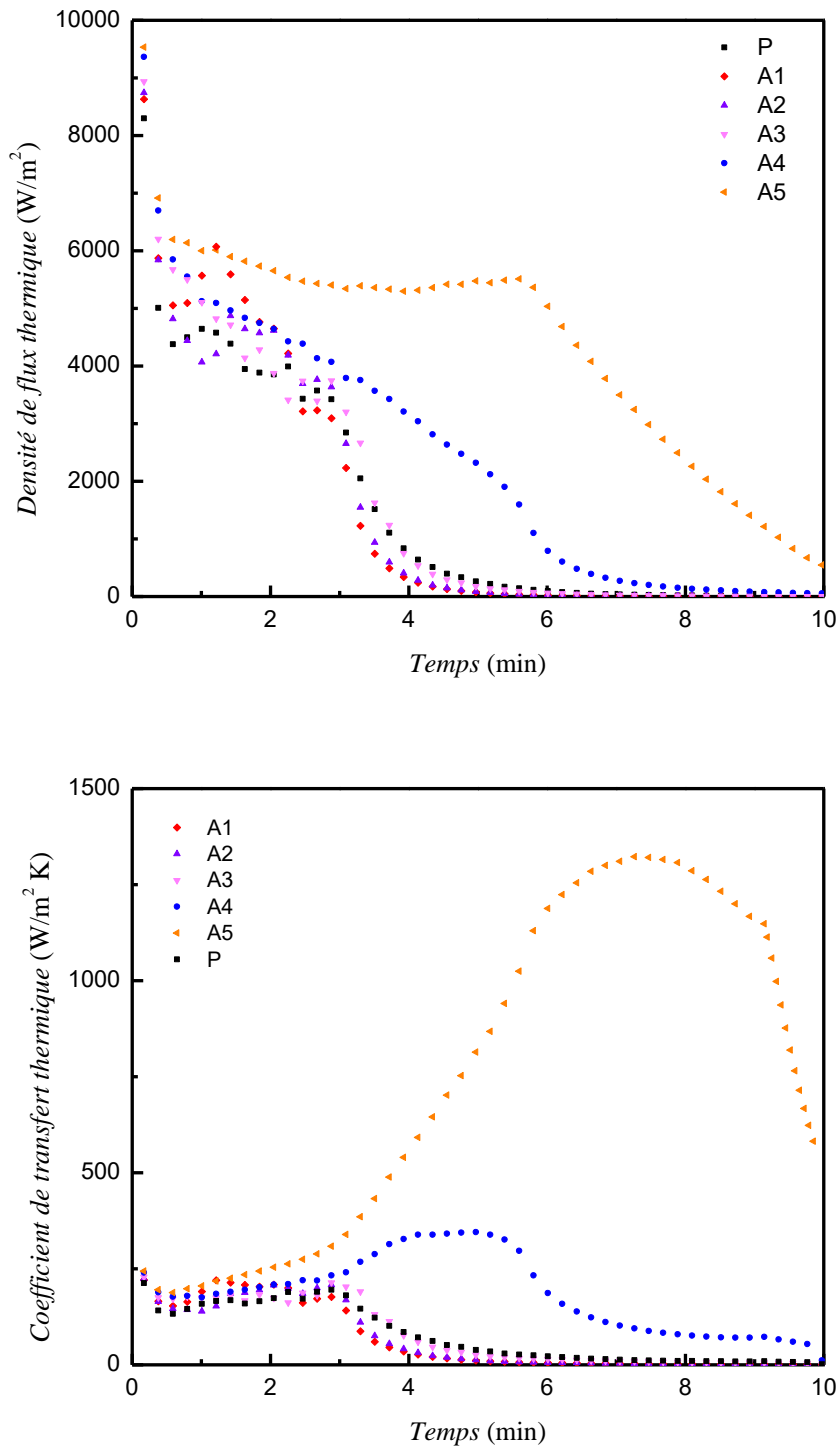
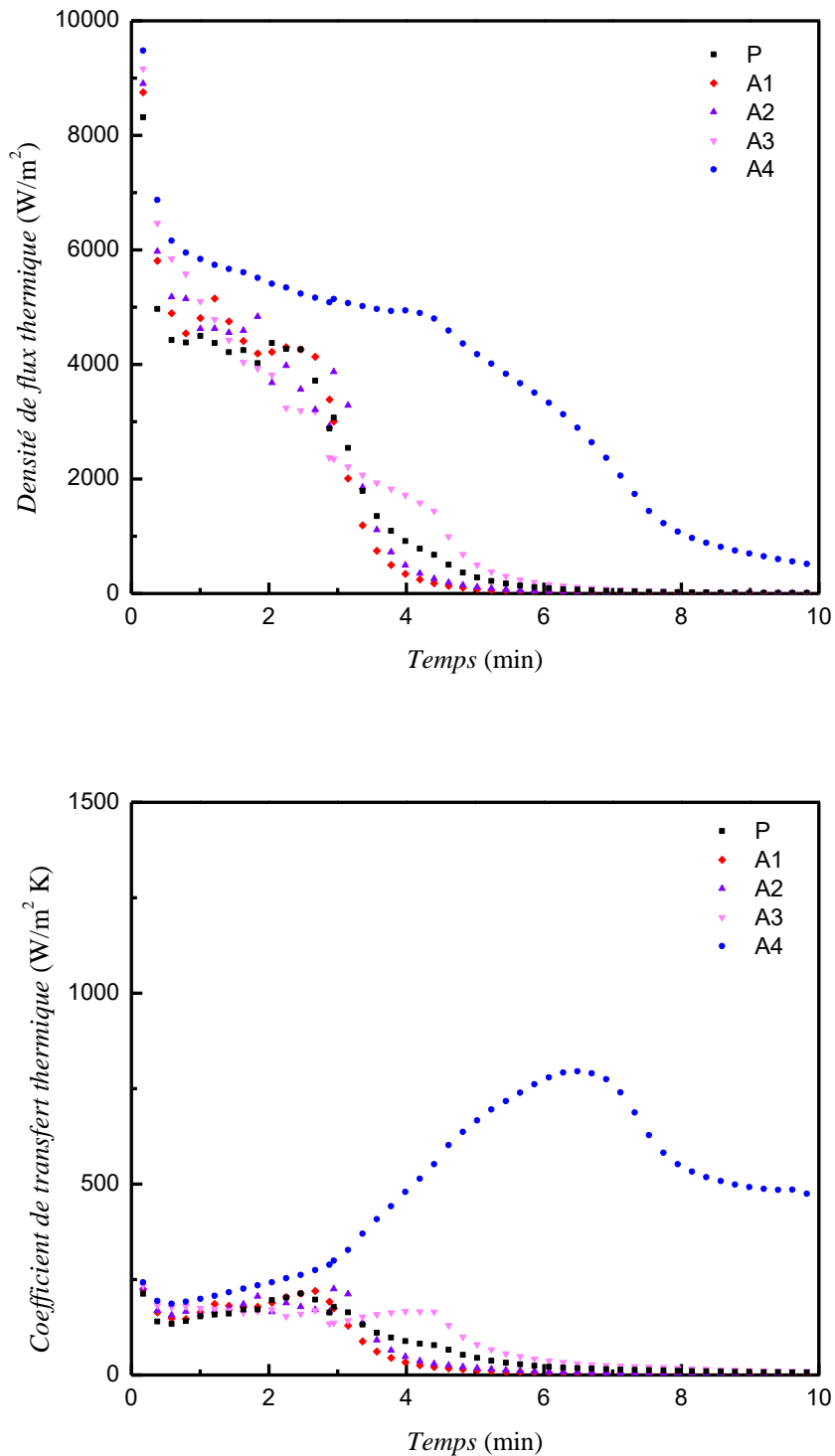


Figure 4.5. Front de fusion (a), lignes de courants (b), et isothermes (c) pour les cas des échangeurs à 8 ailettes



**Figure 4.6.** Densité de flux de chaleur et coefficient de transfert thermique en fonction du temps pour le cas de 8 ailettes (cas C1)



**Figure 4.7.** Densité de flux de chaleur et coefficient de transfert thermique en fonction du temps pour le cas de 8 ailettes (cas C2)

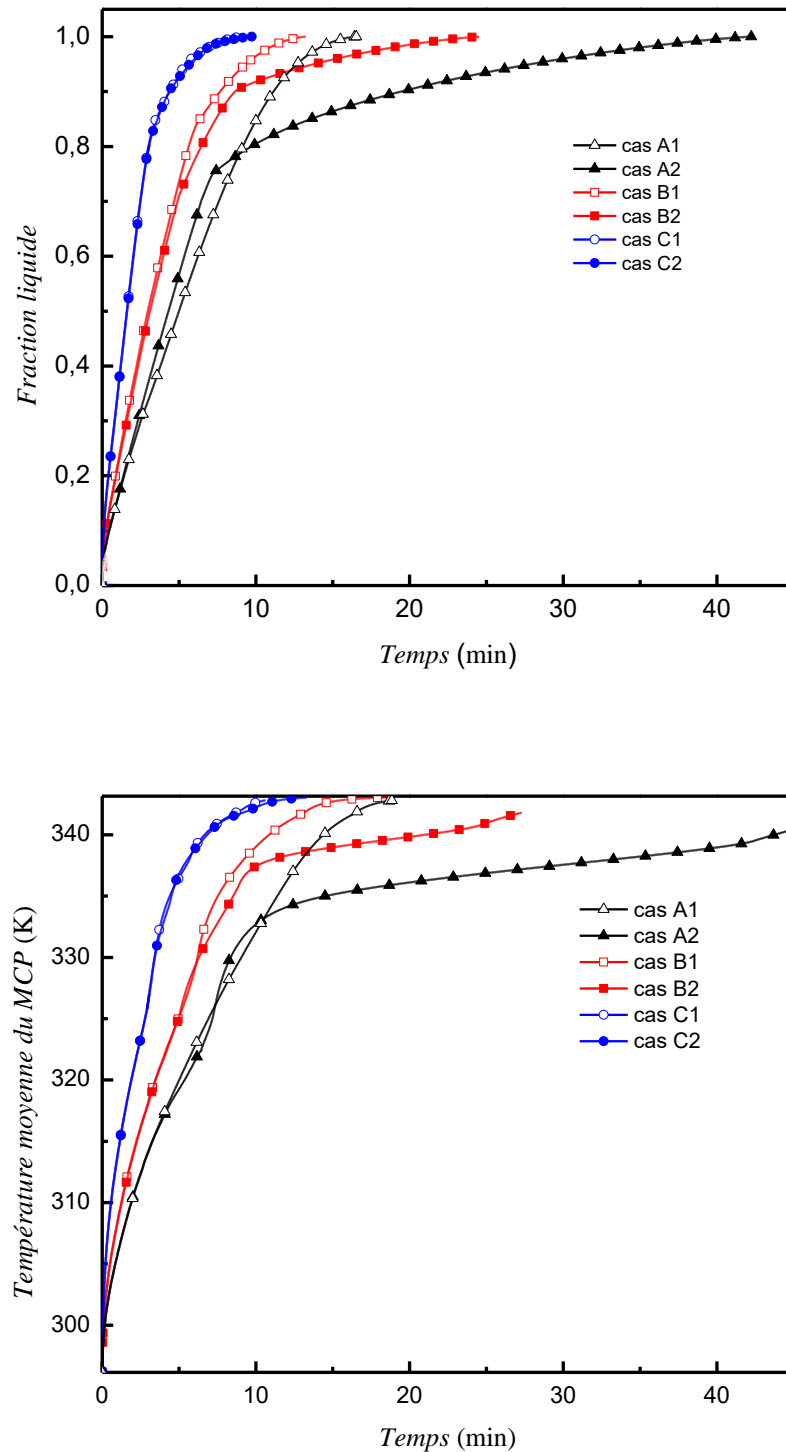
La variation du HF et du HTC en fonction du temps est illustrée dans les figures 4.6, 4.7 pour les cas c1 et c2, respectivement. Comme mentionné précédemment, la température et les régions du MCP liquide sont réparties plus uniformément dans la conduite à 8 ailettes, par rapport aux cas ayant un nombre inférieur d'ailettes. Par conséquent, ce phénomène se reflète également sur les courbes HF et HTC, où on remarque sur les figures que les principales tendances des courbes sont similaires. Par ailleurs, durant les premières étapes du processus de fusion, les valeurs sont considérablement similaires en raison d'un transfert conductif uniforme au niveau de l'espace annulaire. Il convient de noter que l'ailette F5 présente des valeurs significativement élevées, en particulier après  $t = 2$  min, du fait que la convection naturelle du MCP fondu devient importante après ce temps. L'écoulement de la partie liquide du MCP est dirigé vers le haut par l'effet de flottabilité, ce qui entraîne un taux de circulation plus élevé autour de l'ailette F5. Cela provoque une différence considérable de température permettant une forte convection dans cette région. Au dernier stade du processus fusion, cette tendance devient moins importante car une partie importante du MCP est à l'état liquide et la différence de température commence à diminuer.

#### **4.4. Effet du nombre et de l'orientation des ailettes**

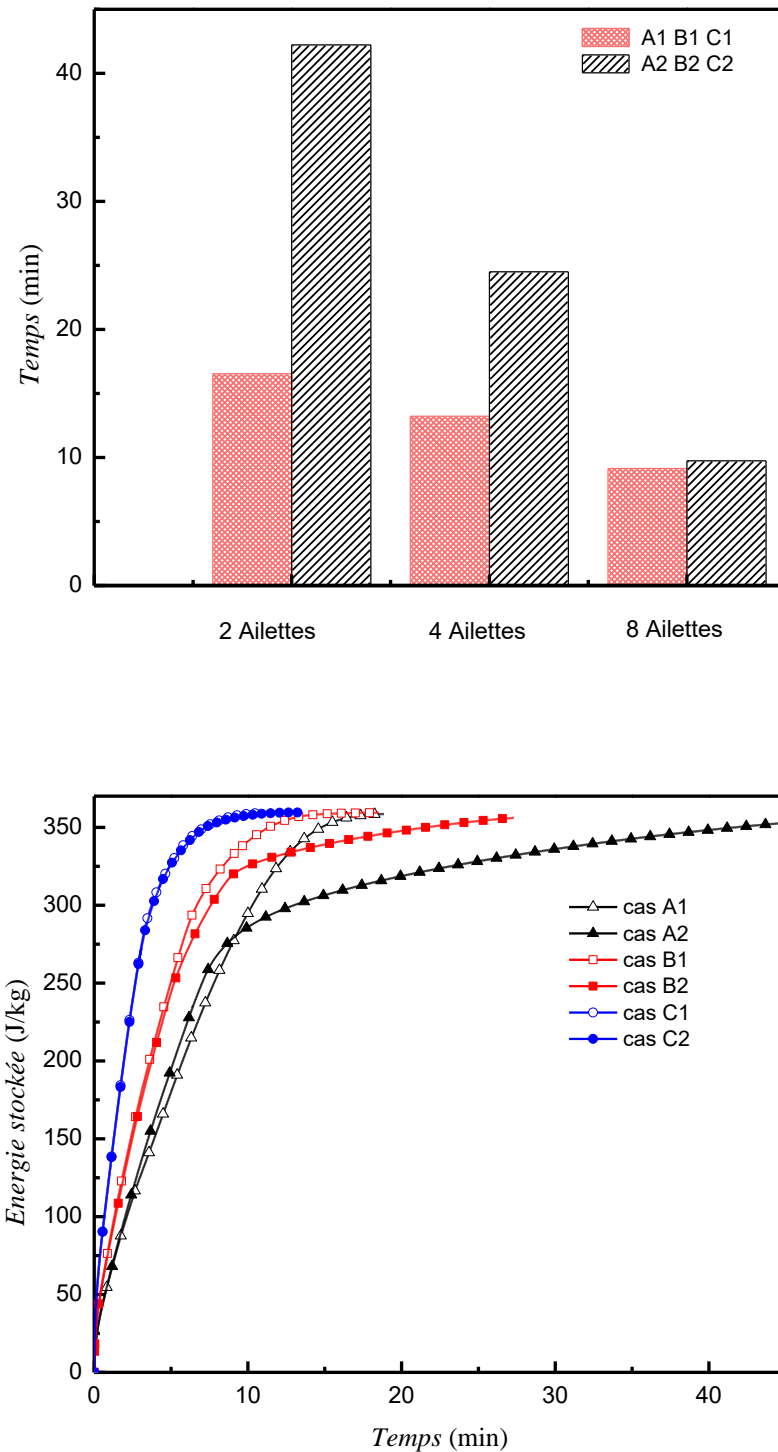
Pour fournir un aperçu clair de l'effet de l'orientation des ailettes, les figures 4.8-4.9 décrivent l'impact de l'orientation des ailettes sur la fraction liquide, la température moyenne, le temps de fusion et le stockage d'énergie. la figure 4.10 montre l'évolution du front de fusion à l'intérieur de la conduite. Compte tenu de la fraction liquide tout au long du processus de fusion, on remarque évidemment sur la figure que le processus de changement de phase est terminé dans un temps nettement plus court lorsque le nombre d'ailettes est élevé, c'est-à-dire dans les cas c1 et c2, ce qui confirme les déductions faites à partir des contours présentés. En se concentrant sur les impacts de l'orientation des ailettes, on remarque que la vitesse de fusion des cas c1 et c2 sont significativement similaires les unes aux autres avec des courbes qui se chevauchent sur la figure, ce qui révèle que l'orientation des ailettes a un effet insignifiant pour ce nombre d'ailettes,  $n = 8$ . D'autre part, pour un nombre inférieur d'ailettes, le temps de fusion change remarquablement par rapport à l'orientation des ailettes. Bien que la fraction liquide en fonction du temps soit similaire jusqu'à un certain point, l'impact de l'orientation des ailettes devient significativement important après ce point et il affecte remarquablement l'évolution de la fraction liquide, ce qui est remarqué d'après les courbes de fraction liquide des cas a2 et b2. On remarque que l'allure de la courbe étant relativement horizontale après un certain point, tandis que celles des cas a1 et b1 l'augmentation de la fraction liquide était régulière. À ce stade, il convient de noter que l'ailette qui est placée verticalement vers le bas dans la région inférieure de la conduite a un rôle important car elle contribue considérablement au processus de convection naturelle entraînant un processus de fusion accéléré. En outre, cela aide également à faire fondre la partie solide restante du MCP aux dernières étapes du processus. Cela ne peut pas être réalisé efficacement par l'autre orientation (par exemple, cas a2 ou b2). En évaluant quantitativement les temps de fusion totaux par le diagramme, on peut noter que le temps de fusion complet du MCP dans le cas a1 est de 16,5 minutes, alors qu'il est de 42,25 minutes dans le cas a2, ce qui signifie que le temps de fusion est retardé de 2,5 fois à mesure que l'orientation des ailettes est modifiée. Cette déduction est également similaire pour les cas b1 et b2. Le temps total de fusion pour le cas b1 est de 13,2 minutes alors qu'il est de 24,5 minutes pour le cas b2. Par contre pour les cas c1 et c2, où la différence est faible, les temps de fusion sont respectivement de 9,1 et 9,7 minutes.

Les déductions faites pour les courbes de fraction liquide peuvent également être confirmées par les courbes de température qui montrent que l'incrément de température moyenne est significativement ralenti après  $t=10$  min pour les cas a2 et b2, par rapport aux cas a1 et b1, respectivement. En outre, le temps requis pour le stockage total d'énergie dans le MCP est également affecté de manière significative par les orientations à des nombres inférieurs d'ailettes. La quantité totale d'énergie stockée est presque la même dans tous les cas considérés car la masse du MCP et du matériau sont les mêmes pour tous les cas. Néanmoins, le temps nécessaire pour stocker une quantité spécifique d'énergie est sensiblement différent car les vitesses de fusion ne sont pas les mêmes pour ces cas, comme discuté précédemment. Au fur et à mesure que le nombre d'ailettes augmente, le temps total de stockage de l'énergie est considérablement raccourci. Par ailleurs, il convient de noter que le temps de fusion peut être considérablement raccourci lorsque l'orientation des ailettes est correctement ajustée, comme le montre la présente étude.

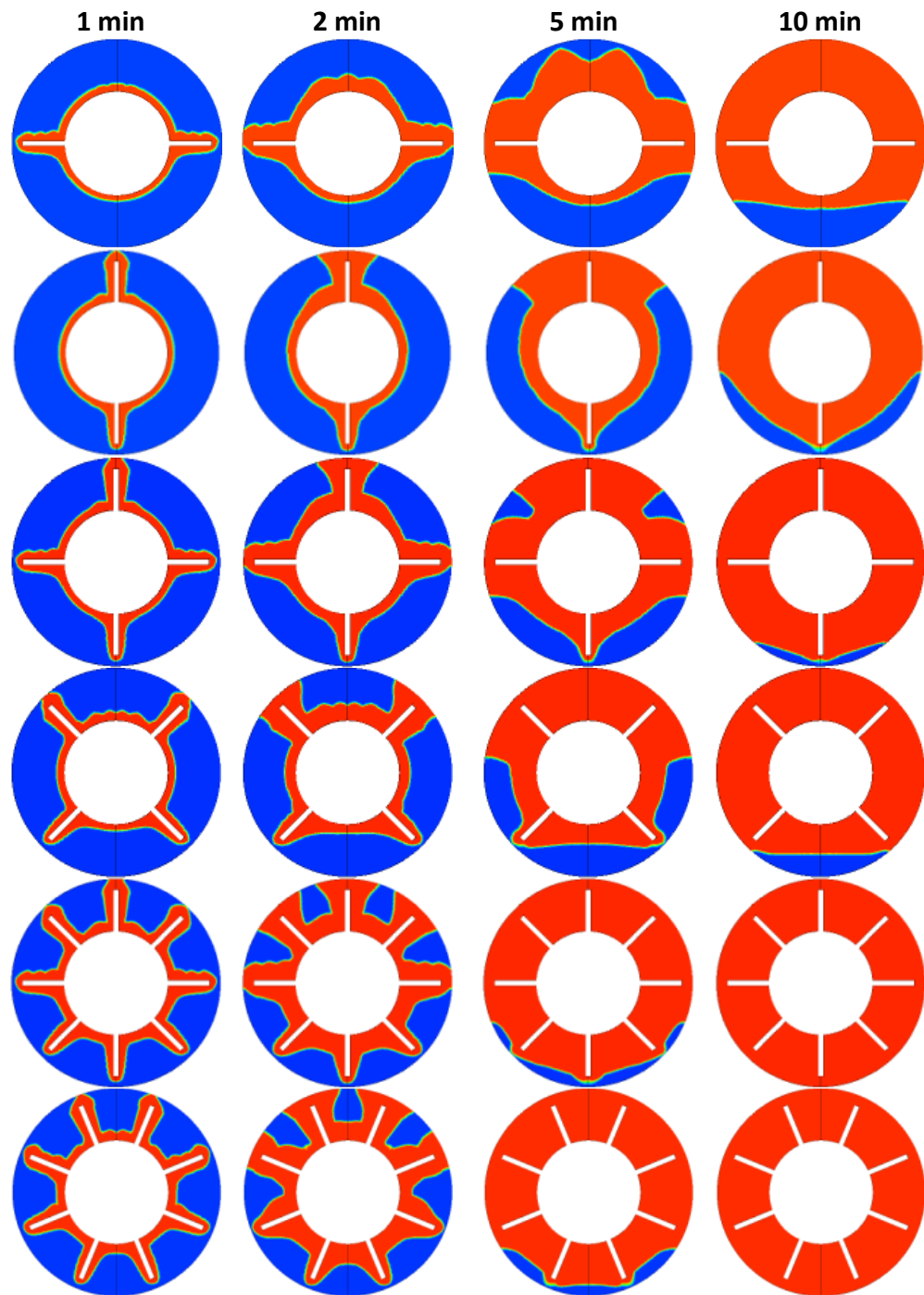
Pour résumer les déductions faites dans cette section, il convient de noter que l'augmentation du nombre d'ailettes améliore considérablement le taux de fusion. Néanmoins, l'orientation des ailettes a un impact remarquable sur le processus de fusion dans l'espace annulaire. La fixation verticale de l'ailette à la région inférieure de l'annulaire raccourcit considérablement le temps total de fusion, par rapport aux cas où l'ailette n'est pas considérée dans une orientation verticale vers le bas. Car, cette ailette verticale aide à la fusion du MCP solide qui reste à la partie inférieure de la conduite durant la phase finale du processus de changement de phase. Pour les autres orientations d'ailettes, cette partie a besoin de plus de temps pour fondre.



**Figure 4.8.** Effets de l'orientation et du nombre d'ailettes ( $N=2,4, 8$ ) sur la fraction liquide et la température moyenne



**Figure 4.9.** Effets de l'orientation et du nombre d'ailettes (N=2, 4, 8) sur le temps de fusion et le stockage d'énergie



**Figure 4.10.** Front de fusion pour différentes orientations et nombre d'ailettes

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le processus de fusion du n-eicosane dans une unité de stockage d'énergie thermique latente dans une conduite horizontale est examiné numériquement en se concentrant sur l'impact de l'orientation des ailettes ( $\pi/2$ ,  $\pi/4$  et  $\pi/8$ ) pour un nombre différent d'ailettes (2, 4 et 8 ailettes). Les résultats obtenus sont présentés sous forme de fraction liquide, lignes de courant et contours de température ainsi que diverses représentations graphiques du flux de chaleur, du coefficient de transfert de chaleur, de la température moyenne, du temps total de fusion et du stockage d'énergie. Les conclusions suivantes sont déduites de la présente étude :

– Dans les toutes premières périodes du processus de charge (environ  $t = 1$  min), le principal mécanisme de transfert de chaleur est la conduction et la couche du MCP liquide est correctement répartie autour des surfaces solides, c'est-à-dire les surfaces du cylindre intérieur et des ailettes.

– Le transfert de chaleur par convection naturelle joue un rôle important dans le processus de charge et l'intensification des courants de convection est sensiblement influencée par le nombre et l'orientation des ailettes.

– Au fur et à mesure que le nombre d'ailettes augmente, la fusion est accélérée et le temps de fusion est remarquablement réduit en raison du taux plus élevé de conduction thermique vers l'anneau par les surfaces étendues. En outre, la température et la partie liquide du MCP à l'intérieur de la conduite sont réparties plus uniformément, offrant un processus de fusion plus uniforme.

– L'orientation des ailettes a un impact remarquable sur la vitesse de fusion et le temps total de fusion pour les nombres d'ailettes de  $n=2$  et 4 alors que son effet est insignifiant pour  $n=8$ .

– Par rapport au cas A2, le temps de fusion est environ 2,5 fois plus court que dans le cas A1, en raison de l'orientation des ailettes où le placement verticale des ailettes vers le bas est présenté dans le cas A1 et il favorise la fusion du MCP solide qui reste en bas et empêche la stratification de la température. En outre, les valeurs de la densité de flux de chaleur sont nettement plus élevées au niveau des ailettes inférieures qui sont placées verticalement.

– Le temps de fusion total requis pour le stockage d'énergie à l'intérieur du système est également réduit par la fixation des ailettes et significativement affecté par l'orientation des ailettes pour  $n=2$  et  $4$ , parallèlement aux valeurs de la fraction liquide.

Les résultats de cette étude numérique révèlent l'importance de l'orientation des ailettes pour le processus de fusion à l'intérieur d'une unité de stockage d'énergie thermique latente. L'augmentation du nombre d'ailettes accélère clairement la vitesse de fusion. Ce phénomène est bien connu par les chercheurs. Cependant, cette étude montre que le taux de fusion dans le cas d'une orientation appropriée des ailettes avec un nombre réduit est similaire à celui obtenu par l'utilisation d'un nombre important d'ailettes. Le choix d'une orientation appropriée est plus pratique et moins coûteux dans les applications d'ingénierie pratiques. Des recherches supplémentaires peuvent être envisagées pour l'effet de l'orientation des ailettes dans le cas des tubes à ailettes internes et externes. Différentes formes d'ailettes (Y, V, arborescentes...) méritent également d'être étudiées.

## Références

- [1] Mavrigiannaki A., Ampatzi E. "Latent heat storage in building elements: A systematic review on properties and contextual performance factors". *Renew. Sustain.Energ. Rev.* 60(2016), pp 52–866.
- [2] ELSihy E.S., Wang X., Xu C., and Du X. "investigation on simultaneous charging and discharging process of water thermocline storage tank employed in combined heat and power units". *ASME. J. Energy Resour. Technol.* 143(2021) pp 032001.
- [3] Kumar N., Ness R.V., Chavez R. Jr., Banerjee D., Muley A., and Stoia M. "Experimental analysis of salt hydrate latent heat thermal energy storage system with porous aluminum fabric and salt hydrate as phase change material with enhanced stability and supercooling." *ASME. J. Energy Resour. Technol.* 143(2021), pp 042001.
- [4] Dandotiya D., Banker N.D. "Energy efficiency improvement of a refrigerator integrated with phase change material-based condenser." *ASME. J. Energy Resour. Technol.* 143 (2021), pp 082105.
- [5] Seddegh, S., Tehran, i S.S.M., Wang, X., Cao F., Taylor R.A. "Comparison of heat transfer between cylindrical and conical vertical shell-and-tube latent heat thermal energy storage systems,." *App. Therm. Eng.* 130(2018), pp1349-1362.
- [6] Irbai A.S.I., Najjar Y.S.H. "Enhancement of the melting process in the thermal energy storage system by using novel geometry," *Num. Heat Transfer, PartA: Applications*76(2019),pp1-20.
- [7] Mehryan S.A.M., Ayoubi-Ayoubloo K., Shahabadi M., Ghalambaz M., Talebizadehsardari P., Chamkha A. "Conjugate phase change heat transfer in an inclined compound cavity partially filled with a porous medium: a deformed mesh approach. " *Transp. Porous Med.* 132(2020), pp657–681.
- [8] Xu Y., Li M.J., Zheng Z.J., Xue X.D. "Melting performance enhancement of phase change material by a limited amount of metal foam: Configurational optimization and economic assessment. " *App. Energ.* 212(2018), pp868–880.
- [9] Sundarram S.S., Li W. "The effect of pore size and porosity on thermal management performance of phase change material infiltrated microcellular metal foams. " *Appl. Therm. Eng.* 64 (2014), pp147–154.

- [10] Mahdi J.M., Nsofor E.C. "Multiple-segment metal foam application in the shell-and-tube PCM thermal energy storage system. " *J. Energ. Storage* 20(2018), pp529–541.
- [11] Yang X., Lu Z., Bai Q., Zhang Q., Jin L., Yan J. "Thermal performance of a shell and tube latent heat thermal energy storage unit: Role of annular fins." *App. Energ.* 202(2017), pp558-570.
- [12] Borhani S.M., Hosseini M.J., Ranjbar A.A., Bahrapoury R. "Investigation of phase change in a spiral-fin heat exchanger. " *App. Mathem. Model.* 67(2019), pp297-314.
- [13] Alizadeh M., Hosseinzadeh Kh., Ganji D.D. "Investigating the effects of hybrid nanoparticles on solid-liquid phase change process in a Y-shaped fin-assisted LHTESS by means of FEM." *J. Mol. Liq.* 287(2019), pp. 110931.
- [14] Alizadeh M., Hosseinzadeh Kh., Shahavi M.H., Ganji D.D. "Solidification acceleration in a triplex-tube latent heat thermal energy storage system using V-shaped fin and nano-enhanced phase change material," *App. Therm. Eng.* 163(2019), pp. 114436.
- [15] Ren Q., Xu H., Luo Z. "PCM charging process accelerated with combination of optimized triangle fins and nanoparticles." *Int. J. Therm. Sci.* 140(2019), pp. 466-479.
- [16] Hosseinzadeh Kh., Alizadeh M., Ganji D.D. "Solidification process of hybrid nano-enhanced phase change material in a LHTESS with tree-like branching fin in the presence of thermal radiation." *J. Mol. Liq.* 275(2019), pp. 909-925.
- [17] Pizzolato A., Sharma A., Maute K., Sciacovelli A., Verda, V. "Design of effective fins for fast PCM melting and solidification in shell-and-tube latent heat thermal energy storage through topology optimization." *App. Energ.* 208(2017), pp. 210–227.
- [18] Nóbrega C.R.E.S., Ismail K.A.R., Lino F.A.M. "Correlations for predicting the performance of axial finned tubes submersed in EPCM." *J.Energ.Storage*26(2019),pp.100973.
- [19] Rathod M.K., Banerjee J. "Thermal performance enhancement of shell and tube Latent Heat Storage Unit using longitudinal fins. " *App. Therm. Eng.* 75(2015), pp.1084-1092.
- [20] Huang y., Sun Q, Yao F., Zhang C. "Performance optimization of a finned shell and tube ice storage unit. " *App. Therm. Eng.* 167(2020), pp. 114788.

- [21] Nóbrega C.R.E.S., Ismail K.A.R., Lino F.A.M. "Solidification around axial finned tube submersed in PCM: Modeling and experiments." *J. Energ. Storage* 29(2020), pp. 101438.
- [22] Sheikholeslami M., Haq R., Shafee A., Li Z., Elaraki, Y G., Tlili I. "Heat transfer simulation of heat storage unit with nanoparticles and fins through a heat exchanger." *Int. J. Heat Mass Transfer*. 135(2019), pp. 470-478.
- [23] Sheikholeslami M. "Numerical modeling of nano enhanced PCM solidification in an enclosure with metallic fin." *J. Mol. Liq.* 259(2018), pp. 424-438.
- [24] Patel J.R., Rathod M.K. "Thermal performance enhancement of melting and solidification process of phase-change material in triplex tube heat exchanger using longitudinal fins." *Heat Transfer—Asian Res.* 48(2019), pp. 483-501.
- [25] Abdulateef A.M., Mat S., Abdulateef J., Sopian K., Al-Abidi A.A. "Thermal performance enhancement of triplex tube latent thermal storage using fins-nano-phase change material technique." *Heat Transfer Eng.* 39(2018), pp. 1067-1080.
- [26] Khan L.A., Khan M.M. "Role of orientation of fins in performance enhancement of a latent thermal energy storage unit." *App. Therm. Eng.* 175(2020), pp. 115408.
- [27] Benbrika M., Benbelhout M., Teggat M. "Amélioration de l'efficacité thermique d'un chauffe-eau solaire par l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP)." *Int. J. Scientific Research & Engineering Technology (IJSET)*. 4 (2015), pp 111-115.
- [28] Guelpa E., Verda V. "Thermal energy storage in district heating and cooling systems: a review." *Applied Energy*. 252 (2019), pp 113474
- [29] Al-Abidi A.A., Mat S.B., Sopian K., Sulaiman M.Y., Lim C.H., Th A. "Review of thermal energy storage for air conditioning systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16(2012), p 5802–5819.
- [30] Akrouche A. "Étude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase." (2011). Thèse de doctorat. Université M'hamed Bougara.
- [31] Garcia A.D., Cabeza L.F. "Phase change materials and thermal energy storage for buildings." *Energy and Buildings*. 103(2015), pp 414–419.
- [32] Soupart-caron A. "Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase." (2015). Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes.
- [33] Fubro S., Svendsen S. "Heat storage in a solar heating system using salt hydrates." (1977). Thermal insulation laboratory of Technical University of Denmark.

- [34] Oussama S.Y. "Étude de la convection naturelle dans une enceinte avec des parois contenant des matériaux à changement de phase." (2019). Thèse de doctorat. Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.
- [35] Wong-Pinto L., Milian Y., Ushak S. "Progress on use of nanoparticles in salt hydrates as phase change materials." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 122 (2020), pp 109727.
- [36] Fleischer A.S. (2015). "Thermal energy storage using phase change materials fundamentals and applications." Springer Briefs in Applied Sciences and Technology. Thermal Engineering and Applied Science.
- [37] Sharma A., Taygi V.V., Chen C.R., Buddhi D. "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13(2009), pp 318–345.
- [38] Sarier N., Onder E. "Organic phase change materials and their textile applications: An overview." *Thermochimica Acta*. 540(2012), pp 7–60.
- [39] Hadjieva M., Kanev S., Argirov J. "Thermophysical properties of some paraffins applicable to thermal energy storage." *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 27(1992), pp 181-187.
- [40] Alkan C. "Enthalpy of melting and solidification of sulfonated paraffins as phase change materials for thermal energy storage." *Thermochimica Acta*. 451(2006), pp 126-130.
- [41] Guichard s. "Contribution à l'étude des parois complexes intégrant des matériaux à changements de phase : modélisation, expérimentation, et évaluation de la performance énergétique globale." (2013). Thèse de doctorat. Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie et l'environnement - EA 4518
- [42] Rai A.K., Kumar A. "A review on phase change materials & their applications." *international Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*. 3(2012), pp 214-225
- [43] Su W.; Darkwa J.; Kokogiannakis G. "Review of solid–liquid phase change materials and their encapsulation technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 48(2015), pp 373–391.
- [44] Meng E., Yub H, Zhoua B. "Study of the thermal behavior of the composite phase change material (PCM) room in summer and winter." *Applied Thermal Engineering*. (2017).

- [45] Lee K.O., Medina M.A., Raith E, Sun X. "Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management." *Applied Energy*. 137(2014), pp 699–706.
- [46] Yun B.Y., Yang S., Cho H.M., Chang S.J., Kim S. "Design and analysis of phase change material based floor heating system for thermal energy storage." *Environmental Research* 173(2019), pp 480–488.
- [47] Pasupathy A., Velraj R. "Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management. *Energy and Buildings*." 40(2008), pp 193–203.
- [48] Al-Yasiria Q., Szabób M. "Case study on the optimal thickness of phase change material incorporated composite roof under hot climate conditions." *Case Studies in Construction Materials* 14(2021), pp e00522.
- [49] Socaciu L.G. "Thermal Energy Storage with Phase Change Material." *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies* 11(20) (2012), pp 75-98.
- [50] Waqas A., Kumar S. "Phase change material (pcm)-based solar air Heating system for residential space heating in winter." *International Journal of Green Energy* 10(2013), pp 402–426.
- [51] Zeinelabdein R., Omer S., Mohamed E., Gan G. "Free cooling using phase change material for buildings in hot-arid climate." *International Journal of Low-Carbon Technologies*. (2018), pp 1–11.
- [52] Silva T., Vicente R., Rodrigues F., Samagaio A., Cardoso C. "Performance of a window shutter with phase change material under summer Mediterranean climate conditions." *Applied Thermal Engineering*. 84(2015), pp 246e256.
- [53] Oró E., Jong E., Cabeza L.F. "Experimental analysis of a car incorporating phase change material. *Journal of Energy Storage*." 7(2016), 131-135.
- [54] Purusothaman M., kota S., C S.C., R S. "Experimental investigation of thermal performance in a vehicle cabin test setup with PCM in the roof." *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 197(2017), pp 012073.
- [55] Maxa J., Novikov A., Nowotnick M. "Thermal peak management using organic phase change materials for latent heat storage in electronic applications." *European Microelectronics Packaging Conference*. (2017).

- [56] Kandasamy R., Wang X., Mujumdar A.S. "Application of phase change materials in thermal management of electronics." *Applied Thermal Engineering*. 27(2007), pp 2822–2832.
- [57] Baby R., Balaji C. "Thermal management of electronics using phase change material based pin fin heat sinks." *Journal of Physics: Conference Series* 395(2012), pp 012134.
- [58] Colla L., Ercole D., Fedele L., Mancin S., Manca O., Bobbo S. "nano-phase change materials for electronics cooling applications." *Journal of Heat Transfer*. 139(2017), pp 052406-1.
- [59] Zeng L., Lu J., Li Y., Li W., Liu S., Zhu J. "Numerical study of the influences of geometry orientation on phase change material's melting process." *Advances in Mechanical Engineering*. 9(10) (2017), pp 1-11.
- [60] Laouer A., Arıcı M., Teggat M., Bouabdallah S., Yıldız Ç., Ismail K.A.R., Ajarostaghi S.S.M., Mezaache E. "effect of magnetic field and nanoparticle concentration on melting of cu-ice in a rectangular cavity under fluctuating temperatures." *Journal of Energy Storage* 36 (6) (2021), pp 102421
- [61] Hoseinzadeh S., Ghasemiasl R., Havaei D., Chamkha A.J. "Numerical investigation of rectangular thermal energy storage units with multiple phase change materials." *Journal of Molecular Liquids*. 271 (2018), PP 655-660.
- [62] Laouer A, Boulaktout N, Mezaache E, Laouar S. "study of natural convection melting of phase change material inside a rectangular cavity with non-uniformly heated wall." *Defect and Diffusion Forum*. 406(2012), pp 3-11.
- [63] Kamkari B., Amlashi H.J. "Numerical simulation and experimental verification of constrained melting of phase change material in inclined rectangular enclosures." *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 88(2017), pp 211–219.
- [64] Groulx D., Biwole P.H., Bhouria M. "Phase change heat transfer in a rectangular enclosure as a function of inclination and fin placement." *International Journal of Thermal Sciences*. 151 (2020), pp 106260.
- [65] Hong Y., Ye W.B., Huang S.M, Yang M., Du J. "Thermal storage characteristics for rectangular cavity with partially active walls." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 126(2018), pp 683–702.
- [66] Bouteldja M., Mezaache E., Laouer A. "Numerical study of the solidification of phase change materials in a rectangular cavity: Effects of convection and aspect ratio." *Annales de Chimie: Science des Matériaux*. 43 (1) (2019), pp 1-9.

- [67] Talukdar S, Afroz H.M.M, Hossain M.A, Aziz M.A, Hossain M.M. "Heat transfer enhancement of charging and discharging of phase change materials and size optimization of a latent thermal energy storage system for solar cold storage application." *Journal of Energy Storage*. 24(2019), pp 10079.
- [68] Biwole P.H., Groulx D., Souayfane F., Chiu T. "Influence of fin size and distribution on solid-liquid phase change in a rectangular enclosure." *International Journal of Thermal Sciences*. 124 (2018), pp 433-446.
- [69] Arici M., Tütüncü E., Kan M., Karabay H. "Melting of nanoparticle-enhanced paraffin wax in a rectangular enclosure with partially active walls." *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 104(2017), pp 7–17.
- [70] Chamkha A.J, Doostanidezfuli A, Izadpanahi E, Ghalambaz M. "Phase-change heat transfer of single/hybrid nanoparticles-enhanced phase-change materials over a heated horizontal cylinder confined in a square cavity." *Advanced Powder Technology*. 28 (2) (2017), pp 385-397.
- [71] Sardari P.T., Walker G.S., Gillott M., Grant D., Giddings D. "Numerical modelling of phase change material melting process embedded in porous media: Effect of heat storage size." *Journal of Power and Energy*. 0(0) (2019), pp 1–19.
- [72] Sajen S.J., Sundaram P., Yogyaveedu C.T. "Thermal property enhancement on water based pcm in spherical container for cold storage applications." *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 912(2020), pp 042061.
- [73] Ehms J.H.N., Oliveski R.D.C., Rocha L.A.O., Biserni C. "Theoretical and numerical analysis on phase change materials (PCM): A case study of the solidification process of erythritol in spheres." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 119(2018), pp 523–532.
- [74] Faistauer F., Rodrigues P., Oliveski R C. "Numerical Study of Phase Change of PCM in Spherical Cavities." *Trans Tech Publications*. 372(2017), pp 21-30. [10.4028/www.scientific.net/DDF.372.21](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.372.21)
- [75] Archibolda A.R., Gonzalez-Aguilarb J., Rahman M.M., Goswami D.Y., Romero M., Stefanakos E.K. "The melting process of storage materials with relatively high phase change temperatures in partially filled spherical shells." *AppliedEnergy* 116(2014), pp 243–252.
- [76] Aziz S., Amin N.A.M., Abdul Majid M.S., Bruno F., Belusko M. "Effectiveness-NTU correlation for a TES tank comprising a PCM encapsulated in a sphere with heat transfer enhancement." *Applied Thermal Engineering*. 143 (2018), pp 1003-1010.
- [77] Temirel M., Hu H., Shabgard H., Boettcher P., McCarthy M., Sun Y. "Solidification of additive-enhanced phase change materials in spherical enclosures with convective cooling." *Applied Thermal Engineering*. 111(2017), pp 134–142.

- [78] Darzi A.R., Farhadi M., Sedighi K. "Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus." *Applied Mathematical Modelling*. 36 (9) (2012), pp 4080-4086.
- [79] Mat S., Al-Abidi A.A., Sopian K, Sulaiman M.Y., Mohammad A.T. "Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal–external fins." *Energy Conversion and Management*. 74(2013), pp 223–236.
- [80] Al-Abidi A.A, Mat S, Sopian K, Sulaiman MY, Mohammad AT. "Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers." *Applied Thermal Engineering*. 53 (1) (2013), pp 147-156.
- [81] Eslamnezhad H., Rahimi A.B. "Enhance heat transfer for phase-change materials in triplex tube heat exchanger with selected arrangements of fins." *Applied Thermal Engineering*. 113(2017), pp 813-821.
- [82] Abdulateef A.M, Abdulateef J, Al-Abidi A.A, Sopian K, Mat S, Mahdi M.S. "A combination of fins-nanoparticle for enhancing the discharging of phase-change material used for liquid desiccant air conditioning unite." *Journal of Energy Storage*. 24(2019), pp 100784.
- [83] Koller M., Walter H., Hameter M. "Transient numerical simulation of the melting and solidification behavior of nano<sub>3</sub> using a wire matrix for enhancing the heat transfer." *Energies*. 9 (2016), pp 205.
- [84] Reddy K.D., Venkataramaiah P., Lokesh T.R. "parametric study on phase change material based thermal energy storage system." *Energy and Power Engineering* 6 (2014), pp 537-549.
- [85] Korawan A.D., Soeparman S., Wijayanti W., Widhiyanuriyawan D. "Increased melting heat transfer in the latent heat energy storage from the tube-and-shell model to the combine-and-shell model." *Hindawi Modelling and Simulation in Engineering*. (2017), pp 9.
- [86] Iachachene F., Haddad Z., Oztop H.F., Abu-Nada E. "Melting of phase change materials in a trapezoidal cavity: Orientation and nanoparticles effects." *Journal of Molecular Liquids*. 292(2019), pp 110592.
- [87] Andreozzi A., Buonomo B., Ercole D., Manca O. "Solar energy latent thermal storage by phase change materials (pcms) in a honeycomb system. " *Thermal Science and Engineering Progress*. 6(2018), pp 410-420.
- [88] Huo Y., Guo Y., Rao Z. "Investigation on the thermal performance of phase change material/porous medium-based battery thermal management in pore scale." *Int J Energy Res* 43(2018), pp 767–778.

- [89] Boukani N.H., Dadvand A., Chamkha A.J. "Melting of a nano-enhanced phase change material (NePCM) in partially-filled horizontal elliptical capsules with different aspect ratios." *International Journal of Mechanical Sciences* 149(2018), pp 164–177.
- [90] Shahsavar A., Al-Rashed A.A.A.A., Entezari S. "Melting and solidification characteristics of a double-pipe latent heat storage system with sinusoidal wavy channels embedded in a porous medium." *Energy*. 171(2019), pp 751-769.
- [91] Al-abidi A.A., Mat S.B., Sopian K., Sulaiman M., Mohammed A.T. "CFD applications for latent heat thermal energy storage: a review." *Renewable and sustainable energy reviews*. 20 (2013), pp 353-363.
- [92] Muhammad M.D., Badr O., Yeung H. "Validation of a CFD melting and Solidification model for phase change in Vertical cylinders." *Numerical Heat Transfer*. 68(2015), pp 501–511.
- [93] Voller, V.R., Prakash, C. "A fixed grid numerical modelling methodology for convection diffusion mushy region phase change problem." *Int .J.heat and mass transfer*. 30(8) (1987), pp1707-1719.
- [94] "ANSYS Fluent user's guide." (2011), Release 14.0 ed., ANSYS Inc, Canonsburg, PA.
- [95] Seddegh S., Wang X., Henderson A.D. "A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change materials." *Applied Thermal Engineering* 93(2016), pp 348–358.
- [96] Brent A.D., Voller V.R., Reid K.J. "Enthalpy-porosity technique for melting convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal." *Numer Heat Transfer*. 13(1988), pp 297–318.
- [97] Ye W.B., Zhu D.S., Wang N. "Numerical simulation on phase-change thermal storage / release in a plate-fin unit." *Applied Thermal Engineering*. 31(2011), pp 3871-3884.
- [98] Al-Abidi A.A, Mat S.B., Sopian K., Sulaiman M.Y., Lim C.H., Th A. "Review of thermal energy storage for air conditioning systems." *Renew Sustain Energy*. 16(2012), pp 5802–5819.
- [99] Herbinger F., Skaalum J., Groulx D. "Experimental study of a latent storage system using a vertical-finned tube and shell heat exchanger: Early results." *3rd Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC)*. 22887(2018). Fort Lauderdale, FL, USA.
- [100] Medrano M., Yilmaz M.O., Nogués M., Martorell I., Roca J., Cabeza L.F. "Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems." *Applied Energy*. 86(2009), pp 2047–2055.
- [101] Joulin A., Younsi Z., Zalewski L., Lassue S., Rousse D.R., Cavrot J.P. "Experimental and numerical investigation of a phase change material: Thermal-energy storage and release." *Applied Energy*. 88(2011), pp 2454–2462.

